Phys. g. 628 k (3

MÜLLER-POUILLET'S

LEHRBUCH DER PHYSIK

UND

METEOROLOGIE.

DRITTER BAND.

Holzstiche
aus dem xylographischen Atelier
von Friedrich Vieweg und Sohn
in Braunschweig.

Papier
aus der mechanischen Papier-Fabrik
der Gebrüder Vieweg zu Wendhausen
bei Braunschweig.

MÜLLER-POUILLET'S

LEHRBUCH DER PHYSIK

UND

METEOROLOGIE.

NEUNTE

UMGEARBEITETE UND VERMEHRTE AUFLAGE

VON

LEOP. PFAUNDLER,

Dr. der Philosophie, Ritter des Ordens der eisernen Krone III. Classe, Besitzer des goldenen Verdienstkreuzes mit der Krone, Professor der Physik an der Universität Innsbruck, wirklichem Mitgliede der Kaiserl. Akademie der Wissenschaften in Wien und mehrerer anderen gelehrten Gesellschaften.

IN DREI BÄNDEN.

MIT GEGEN 2000 HOLZSTICHEN, TAFELN, ZUM THEIL IN FARBENDRUCK, UND EINER PHOTOGRAPHIE.

DRITTER BAND.

BRAUNSCHWEIG,

DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN.

1888 – 1890.

Td|69|367

Alle Rechte vorbehalten.

Bayerische
Staatsbibliothek
München

VORREDE ZUR NEUNTEN AUFLAGE

DES

DRITTEN BANDES.

Hiermit übergebe ich dem physikalischen Publicum die neunte gänzlich umgearbeitete Auflage des dritten Bandes des ehemals Pouillet-Müller'schen Lehrbuches. Dass dieser den Magnetismus und die Elektricität behandelnde dritte Band noch vor dem zweiten, die Optik und Wärmelehre enthaltenden neu bearbeitet wurde, hat seinen triftigen Grund in dem Umstande, dass die achte, obwohl erst vor 7 Jahren erschienene Auflage in Folge der unerwartet raschen Entwicklung der elektrischen Disciplinen und der Elektrotechnik viel mehr veraltet erschien, als der zweite Band. Man bedenke, dass in diese Zeitperiode die elektrischen Ausstellungen in Paris, München und Wien, sowie die beiden elektrischen Congresse fallen, welche so mächtig zur Ausbildung der theoretischen und technischen Elektricitätlehre beigetragen haben.

Die in diesem Bande vorgenommenen Veränderungen und Vervollständigungen sind insbesondere folgende. Vor Allem wird überall consequent das absolute auf Centimeter, Gramm und Secunde basirte Maasssystem zur Anwendung gebracht. Bei den magnetischen Erscheinungen wird das so anschauliche Hülfsmittel der Kraftlinien und Niveauflächen nach den Ideen von Faraday und Maxwell ausgiebiger ausgenutzt; es wird gezeigt, wie die Kraftliniensysteme zu zeichnen sind und hiervon an den beiden Hauptfällen der Astasirung eines Magnets durch einen andern nützliche Anwendung gemacht. Dass sowohl bei den magnetischen als bei den elektrischen Erscheinungen der Begriff des Potentials zu Grunde gelegt wurde, erscheint wohl als selbstverständlich; ist er ja doch allein geeignet, das Verständniss zu erleichtern, oder besser gesagt, überhaupt zu

ermöglichen. Der Bestimmung der Horizontalcomponente des Erdmagnetismus wurden mehrere Paragraphen gewidmet und auch die bisher wenig beachtete Töpler'sche Methode beschrieben. Von den magnetischen Messinstrumenten F. Kohlrausch's wurden einige abgebildet und erklärt. In der Elektricitätslehre war ich bemüht, gewissen Schwierigkeiten nicht aus dem Wege zu gehen, sondern dieselben vielmehr durch desto sorgsamere Behandlung zu überwinden. Dabei wurde insbesondere versucht, durch Heranziehung hydrostatischer und hydrodynamischer Analogien das Verständniss zu fördern. Besondere Sorgfalt ist auf die Erklärung der Influenzwirkung mit Zugrundelegung des Potential- und Capacitätsbegriffs verwendet, da von deren richtiger Auffassung das Verständniss alles Folgenden wesentlich abhängt. Eine bedeutende Erweiterung hat ferner die Beschreibung, Geschichte und Theorie der Influenzmaschine erfahren, wobei insbesondere die darauf bezüglichen Erfindungen A. Töpler's und seine Darstellung des Princips des Duplicators und der Varley'schen Maschine herangezogen wurden. Die Begriffe Potential, Spannung und Dichte, durch deren Verwechslung so viel Unheil angerichtet worden ist, sind strenge aus einander gehalten und in ihren Beziehungen dargelegt. Die Theorie der Ansammlungsapparate wurde im Wesentlichen nach dem Vorbilde der Darstellungen von Serpieri und von Tumlirz wiedergegeben. Bei der atmosphärischen Elektricität sind die Arbeiten Fr. Exner's, beim Blitzableiter die Erfahrungen von Mach, Siemens und Töpler verwerthet worden.

In der Lehre vom Galvanismus hat sich die Erwartung, dass die Arbeiten F. Exner's zu einer Einigung auf Grund einer modificirten chemischen Theorie der Contacterscheinungen führen werde, nicht erfüllt und ist die Controverse über dieses meist umstrittene Thema neuerdings in den Vordergrund getreten. Als Verfasser des Lehrbuches konnte ich hierbei nur die Rolle eines Berichterstatters übernehmen. Desto mehr hielt ich es aber nothwendig, dem Volta'schen Fundamentalversuch eine erhöhte Sorgfalt zuzuwenden und insbesondere alle Unklarheiten, welche früher oft in Folge der Nichtberücksichtigung des Potential- und Capacitätsbegriffes aufgetreten sind, zu vermeiden.

Die in der vorigen Auflage nicht ganz richtig dargestellte Beziehung der Contacttheorie zum Princip der Erhaltung der Energie

sowie die Erörterung über Sitz und Ursprung der elektromotorischen Kraft erscheinen wesentlich corrigirt. Bei der Strommessung wird gleich von Anfang an das absolute Maasssystem eingeführt und ausschliesslich angewendet. Die Einheiten des Widerstandes und der elektromotorischen Kraft werden auf die Wärmewirkungen des Stromes gegründet, da die aus den Inductionsgesetzen abgeleiteten Definitionen erst gegen Ende des Buches behandelt werden können und es doch sehr wünschenswerth ist, schon früher mit Ohm und Volt zu operiren. Die Darstellung des Ohm'schen Gesetzes sowie die Ableitung der Kirchhoff'schen Gesetze wurden verbessert, die Beschreibung der Widerstandsapparate, der Brückenmethoden und Compensationsmethoden vervollständigt. Neu bearbeitet wurden die Paragraphen über secundäre Elemente und Accumulatoren, über das Joule'sche Gesetz, Stromenergie und Stromeffect, das elektrische Glühlicht, das Bogenlicht und seine Regulatoren. Ganz umgearbeitet wurde gemäss den Arbeiten von v. Helmholtz, Braun, Jahn u. A. der Paragraph über den Zusammenhang zwischen Stromenergie und chemischer Energie. Endlich wird der Leser in den letzten Capiteln noch manche Verbesserungen in der Darstellung (Induction, Dynamomaschine), sowie Bereicherungen (Entdeckungen von Kundt, Hall, v. Ettingshausen u. A.) finden.

Dass neben Vielem, was berücksichtigt wurde, noch ein Mehreres übergangen worden ist, was ebenfalls Berücksichtigung verdient hätte, muss ich leider zugestehen. Ich könnte zur Entschuldigung nur wiederholen, was ich am Schlusse der Vorrede zum ersten Bande dieser Auflage bereits gesagt habe und verweise auf die dortigen Worte.

Zum Danke verpflichtet bin ich für mehrfache Winke, Rathschläge oder Beiträge den verehrten Herren Collegen Professor A. v. Ettingshausen, V. v. Lang, E. Mach, F. Kohlrausch, A. v. Waltenhofen sowie insbesondere A. Töpler. Endlich ergreife ich diese Gelegenheit, um zahlreichen Fachgenossen für freundliche Zusendung von Separatabdrücken meinen Dank auszudrücken.

Innsbruck, im März 1888.

Dr. Leop. Pfaundler.

INHALTSVERZEICHNISS DES DRITTEN BANDES.

Fünftes Buch.

Die elektrischen Erscheinungen.

Erstes Capitel.

Vom Magnetismus.

Seite

1. Anziehung des Eisens durch Magnete 3
2. Verschiedenheit der Pole, Anziehung und Abstossung derselben 4
3. Magnetisirung durch Influenz 6
4. Entstehung permanenter Magnete 9
5. Methoden zur Herstellung von Stahlmagneten 11
6. Potentielle Energie des Magneten 14
7. Magnetische Armaturen . 16
8. Tragkraft der Hufeisenmagnete 19
9. Vorstellungen über das Wesen des magnetischen Zustandes 20
10. Vertheilung des Magnetismus in Magnetstäben 22
11. Lage der magnetischen Pole 25
12. Der Sättigungspunkt . 26
13. Einfluss der Wärme auf den Magnetismus 28
14. Magnetische Declination . 29
15. Magnetische Inclination . 33
16. Richtende Kraft des Erdmagnetismus 35
17. Astatische Nadeln . 36
18. Das Magnetometer . 37
19. Der magnetische Theodolit . 44
20. Variationen und Störungen der Declination und Inclination 47
21. Intensität des Erdmagnetismus 49
22. Einfluss des Erdmagnetismus auf das Eisen 51
23. Bestimmung der Inclination . 52
24. Relative Messung der magnetischen Kräfte 56
25. Gesetz der Kraftwirkung zweier Magnetpole auf einander 59
26. Absolutes Maass der Polstärke, des Stabmagnetismus und der Intensität eines magnetischen Feldes 61
27. Arbeit bei Annäherung oder Entfernung von Magnetpolen, Begriff des magnetischen Potentials 63
28. Potentialniveauflächen eines Pols 66
29. Kraftlinien eines Pols . 69
30. Ableitung der Intensität des magnetischen Feldes aus den Niveaulinien und den Kraftlinien 72
31. Construction der Niveaulinien für ein System zweier gleich starker ungleichnamiger Pole 74

Seite

32. Construction der Kraftlinien für ein System zweier gleich starker ungleichnamiger Pole . 78
33. Die Niveauflächen und Kraftlinien eines homogenen magnetischen Feldes . 82
34. Kraftlinien eines Magnets, der sich im magnetischen Felde des Erdmagnetismus befindet . 85
35. Experimentelle Darstellung und Fixirung der Kraftlinien 90
36. Verhalten des weichen Eisens im magnetischen Felde; Inductionscoëfficient, magnetische Schirmwirkung 93
37. Berechnung der Kraftwirkung eines Magnetstabes auf eine Magnetnadel in den beiden Hauptlagen 96
38. Experimentelle Prüfung des Gesetzes über die Wirkung zweier Magnete auf einander . 99
39. Bestimmung der horizontalen Componente des Erdmagnetismus nach absolutem Maasse; die Schwingungsversuche 101
40. Bestimmung der Horizontalcomponente des Erdmagnetismus, Fortsetzung 104
41. Bestimmung der Intensität des Erdmagnetismus mit dem magnetischen Theodolit; relative Intensitätsmessungen 107
42. Andere Methoden zur absoluten Bestimmung der magnetischen Intensität . 110
43. Variationen der Intensität des Erdmagnetismus 112
44. Bestimmung des magnetischen Moments eines Stabes nach absolutem Maasse. Specifischer Magnetismus 117
45. Magnetische Karten, Isogonen, Isoklinen und Isodynamen 118
46. Ueber die Ursache des Erdmagnetismus 121

Zweites Capitel.

Die Erscheinungen der elektrischen Spannung.

47. Fundamentalversuche, Elektrisirung durch Reibung 123
48. Leiter und Nichtleiter der Elektricität 125
49. Von den beiden Arten der Elektricität 127
50. Vorstellungen über das Wesen der Elektricität 132
51. Elektrisirung durch Mittheilung 134
52. Vorläufige Begriffsbestimmung des elektrischen Potentials und der elektrischen Capacität . 136
53. Die elektrische Influenz oder Vertheilung 139
54. Anwendungen der Influenzwirkung, Ladung der Elektroskope 145
55. Das Verhalten dielektrischer Körper 147
56. Sitz der elektrischen Ladung . 149
57. Anordnung der Elektricität auf der Oberfläche isolirter Leiter; Dichte der Elektricität; Wirkung der Spitzen und Flammen; Tropfencollector . 153
58. Der Elektrophor . 157
59. Die Reibungselektrisirmaschine 160
60. Dampfelektrisirmaschine . 166
61. Die Influenzmaschine, Maschinen von W. Holtz 170
62. Duplicatoren, Geschichtliches, Töpler's Influenzmaschinen mit sogenannter Selbsterregung . 181
63. Versuche mit der Elektrisirmaschine 195
64. Coulomb's Gesetz; Nachweis desselben durch Experimente und theoretische Folgerungen . 201

Seite

65. Absolutes elektrostatisches Maass der Elektricitätsmengen 206
66. Potential einer Kugel; Wirkung der oberflächlichen Elektricität auf das Innere, Wirkung einer inneren Elektricität auf die Oberfläche und nach aussen. Absolute Einheit des Potentials . . 209
67. Potential einer Elektricitätsmenge auf sich selbst; Potentielle Energie einer elektrischen Ladung 212
68. Die elektrische Capacität und deren absolutes Maass 214
69. Beziehungen zwischen Potential, Spannung und Dichte 216
70. Apparate zur Messung des Potentials. Elektrometer nach Dellmann und R. Kohlrausch 218
71. W. Thomson's Quadrantenelektrometer; absolutes Elektrometer . . 222
72. Ansammlungsapparate, Leydener Flasche 229
73. Franklin's Tafel, Condensatoren 233
74. Theorie der Leydener Flasche 238
75. Stufenweise Entladung der Leydener Flasche 243
76. Die Lane'sche Maassflasche 246
77. Schlagweite der Leydener Flasche 248
78. Entladungsrückstand und Residuum 252
79. Einfluss der Beschaffenheit des Isolators auf die Condensatorladung. Dielektricitätsconstante 255
80. Verschiedenartige Zusammenstellung von Leydener Flaschen, Franklin's Cascadenbatterie 258
81. Physiologische Wirkungen des Entladungsschlages 264
82. Mechanische Wirkungen der elektrischen Entladung 264
83. Thermische Wirkungen der elektrischen Entladung 269
84. Anwendung des Entladungsschlages in der Sprengtechnik 276
85. Lichterscheinungen bei der elektrischen Entladung, der elektrische Funken . 280
86. Das elektrische Licht im verdünnten Raume 284
87. Dauer des elektrischen Funkens, Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Elektricität . 285
88. Feddersen's Versuche; oscillatorische, continuirliche und intermittirende Entladungen . 289
89. Magnetische Wirkungen der Entladung 293
90. Chemische Wirkungen der Entladung 294
91. Die Lichtenberg'schen Figuren 296
92. Die elektrische Spannung als Form der Energie 298
93. Atmosphärische Elektricität, absolutes Potential der Erde 300
94. Elektricität während der Gewitter 307
95. Wirkungen des Blitzes auf der Erde 309
96. Der Blitzableiter . 311
97. Das Polarlicht . 319

Drittes Capitel.

Der galvanische Strom.

98. Vorbemerkung. Entdeckung des Galvanismus 324
99. Der Volta'sche Fundamentalversuch 328
100. Die elektromotorische Kraft 334
101. Potentiale und Ladungen bei der Berührung und nach der Trennung heterogener Leiter von gleicher Capacität 336

Seite

102 Potentiale und Ladungen bei der Berührung und nach der Trennung heterogener Leiter von ungleicher Capacität; Uebersicht der Resultate . 340
103. Die Spannungsreihe, Gesetz von Volta 343
104. Verhalten der Leiter zweiter Ordnung 346
105. Die Ableitung zur Erde, Exner's Capacitätsversuch 348
106. Der Contactversuch vom Standpunkte der Erhaltung der Energie . . 352
107. Ursprung und Sitz der elektromotorischen Kraft bei der Berührung heterogener Leiter erster Ordnung 354
108. Die Volta'sche Säule . 357
109. Die trockene Säule . 361
110. Das Säulenelektrometer . 364
111. Entstehung des elektrischen Stromes 366
112. Verschiedene Formen der Volta'schen Kette 368
113. Die constanten Ketten im Allgemeinen 371
114. Die Daniell'sche Kette . 373
115. Die Grove'sche und die Bunsen'sche Kette 376
116. Die Chromsäurekette . 380
117. Die Ketten von Smee, Leclanché und Pincus 384
118. Verschiedene Verbindungsweisen Volta'scher Elemente, Klemmen, Stromwähler und Stromwender 387
119. Begriff der Stromstärke, Jakobi'sche Stromeinheit, Volum-Voltameter 392
120. Gewichtsvoltameter, Kupfer-(Silber)voltameter 398
121. Absolute elektromagnetische Maasseinheiten der Stromstärke und der Elektricitätsmenge. Praktische Stromeinheit 400
122. Zurückführung der Voltameterangaben auf absolutes Strommaas. Aichung der Tangentenbussole mittelst Voltameters 406
123. Gleichheit der Stromstärke an allen Stellen des Stromkreises 409
124. Ohm'sches Gesetz; experimenteller Nachweis desselben 412
125. Leitungswiderstand linearer Stromleiter; willkürliche Widerstandseinheiten von Jacobi und Siemens 415
126. W. Weber's absolute Widerstandseinheit, praktische Widerstandseinheit (Ohm) . 419
127. Specifischer Widerstand, Leitungsvermögen 420
128. Leitungswiderstand der Legirungen 423
129. Einfluss der Temperatur auf den Leitungswiderstand der Metalle . . 425
130. Rheostate und Widerstandsetalons 426
131. Maasseinheiten der elektromotorischen Kraft 432
132. Zusammenhang zwischen Potentialdifferenz und elektromotorischer Kraft. Elektromagnetische Capacitätseinheit 434
133. Theoretische Ableitung und graphische Darstellung des Ohm'schen Gesetzes . 437
134. Bestätigungen des Ohm'schen Gesetzes und Folgerungen aus demselben 445
135. Zweckmässigste Combination einer gegebenen Anzahl von Volta'schen Elementen . 449
136. Stromverzweigung, Kirchhoff's Sätze 454
137. Anwendungen der Kirchhoff'schen Sätze 457
138. Die Brückenvorrichtungen von Wheatstone, Kirchhoff, W. Thomson, A. Matthiesen und Hockin 464
139. Leitungswiderstand der Flüssigkeiten 473
140. Die Constanten der Volta'schen Rheomotoren 480
141. Messung der Constanten mittelst der Compensationsmethoden 484
142. Galvanische Polarisation . 489
143. Grove's Gasbatterie . 497

Seite

144. Passivität des Eisens . 498
145. Secundäre Elemente, Accumulatoren 502
146. Einfluss der Polarisation auf die Capillarconstante; Lippmann's Capillarelektrometer . 506
147. Wärmeentwickelung durch den elektrischen Strom, Gesetz von Joule 509
148. Stromenergie, Stromeffect und deren Maasse 516
149. Glühen von Metalldrähten durch den elektrischen Strom 518
150. Das elektrische Glühlicht . 522
151. Der galvanische Funken . 524
152. Das elektrische Bogenlicht . 526
153. Photometrische Vergleichung des elektrischen Bogenlichtes 530
154. Regulatoren (Lampen) für elektrisches Bogenlicht 532
155. Die chemischen Wirkungen des elektrischen Stromes; scheinbare Zerlegung des Wassers 541
156. Elektrolyse der Alkalien . 545
157. Elektrolyse geschmolzener Chlormetalle 547
158. Elektrolyse gelöster Salze . 550
159. Experimente über die Elektrolyse der Salzlösungen 554
160. Faraday's elektrolytisches Gesetz 558
161. Scheinbare Ausnahme von Faraday's Gesetz; elektrolytische Convection . 560
162. Wanderung der Ionen zwischen den Polen 563
163. Mechanische Ueberführung der Flüssigkeiten vom positiven zum negativen Pole . 566
164. Theorie der Elektrolyse . 568
165. Praktische Anwendungen der Elektrolyse 572
166. Die chemischen Vorgänge innerhalb der Volta'schen Ketten 577
167. Zusammenhang zwischen der Stromenergie und der chemischen Energie der Volta'schen Kette 581

Viertes Capitel.

Elektromagnetismus.

168. Ablenkung der Magnetnadel durch den elektrischen Strom 588
169. Galvanoskope, Multiplicatoren 591
170. Galvanometer, Tangenten- und Sinusbussole 597
171. Spiegelgalvanometer im Allgemeinen 601
172. Specielle Formen des Spiegelgalvanometers 604
173. Torsionsgalvanometer und Universalgalvanometer von W. Siemens 614
174. Elektrotechnische Messinstrumente, Ammeter und Voltmeter 619
175. Magnetisirung des weichen Eisens durch den Strom 621
176. Magnetisirung von Stahlstäben durch den Strom 625
177. Gesetze des Elektromagnetismus 626
178. Elektromagnetisches Verhalten des Stahles. Remanenter Magnetismus 632
179. Beziehungen zwischen Torsion und Magnetismus 635
180. Töne beim Magnetisiren des Eisens 636
181. Anziehung und Tragkraft der Elektromagnete 639
182. Vertheilung des Magnetismus im Querschnitte der Eisenstäbe 643
183. Wirkung einer Stromspirale auf Magnete und auf weiches Eisen . . 644
184. Elektromagnetische Motoren . 649
185. Die elektrische Telegraphie . 657

Seite

186. Morse's Schreibtelegraph; Hughes' Drucktelegraph; Caseli's Pantelegraph . . . 659
187. Die elektrischen Registrirapparate . . . 668
188. Das elektrische Chronoskop . . . 672
189. Elektrische Uhren . . . 676

Fünftes Capitel.

Wechselwirkung zwischen Magneten und Stromleitern.

190. Begriff der Magnetoinduction, Beziehung derselben zum Energieprincip 683
191. Bedingung für die Entstehung des Magnetoinductionsstromes und Regel für die Richtung desselben . . . 685
192. Gesetz über die Grösse der durch Magnetoinduction geweckten elektromotorischen Kraft . . . 690
193. Specialisirung des Magnetoinductionsgesetzes, Ableitung der absoluten Einheit der elektromotorischen Kraft . . . 694
194. Gesetz von Lenz; Bewegung eines begrenzten Leiters durch einen Magnet und umgekehrt . . . 698
195. Rotation eines Stromleiters um einen Magnet und umgekehrt . . . 701
196. Rotation eines Magnets um seine eigene Axe, unipolare Induction . 709
197. Inductions- und Bewegungserscheinungen zwischen Magneten und geschlossenen Stromleitern; Maxwell'sche Regel . . . 713
198. Elektromagnetische Motoren von Page, Dub und Kravogl . . . 723
199. Magnetoinduction durch Verschiebung kreisförmiger Leiter senkrecht auf die Magnetaxe . . . 727
200. Magnetoinduction in einem rotirenden geschlossenen Leiter. Stöhrer's elektromagnetischer Motor und Inductor . . . 735
201. Magnetoinduction in einem geschlossenen Leiter, welcher zwischen entgegengesetzten Polen rotirt. Siemens' Cylinderinductor, v. Hefner-Alteneck's magnetelektrische Trommelmaschine 742
202. Magnetoinduction durch das homogene Feld des Erdmagnetismus; Erdinductor; Inclinationsbestimmung . . . 751
203. Ableitung der absoluten Widerstandseinheit mittelst des Erdinductors 758
204. Die magnetoelektrische Maschine von Pacinotti-Gramme nach ihrer ursprünglichen Erklärung . . . 762
205. Die magnetoelektrische Maschine von Pacinotti-Gramme nach neuerer Erklärung . . . 771
206. Die dynamoelektrische Maschine . . . 779
207. Verschiedene Schaltungsweisen an der dynamoelektrischen Maschine 784
208. Elektromotorische Kraft, Klemmenspannung, Nutzeffect und Wirkungsgrad der magnetoelektrischen und Dynamomaschinen . . . 788
209. Beziehung zwischen Stromstärke, elektromotorischer Kraft, Klemmspannung und Widerstand, dargestellt durch die charakteristische Curve . . . 792
210. Die Frölich'sche Stromcurve und die übrigen daraus abgeleiteten Curven . . . 795
211. Hülfsapparate zur Dynamomaschine, Tourenzähler, Tachometer, Dynamometer, Rheostate; absoluter Wirkungsgrad . . . 800
212. Die Wechselstrommaschine . . . 805
213. Die magnetoelektrische und dynamoelektrische Maschine als Motor; elektrische Kraftübertragung . . . 809
214. Dämpfung durch Inductionsströme, Foucault'sche Ströme, Arago's Rotationsmagnetismus . . . 814

Sechstes Capitel.

Wechselwirkung zwischen Strömen und Stromleitern.

Seite

215. Die Kraftlinien der Ströme und Stromkreise; Anziehung und Abstossung paralleler Ströme 820
216. Wirkung gekreuzter Ströme auf einander 826
217. Rotation eines Stromes unter dem Einflusse eines anderen 830
218. Elektrodynamisches Gesetz 831
219. Weber's elektrodynamische Versuche; Elektrodynamometer 832
220. Ampère's Theorie des Magnetismus 836
221. Magnetisches Moment eines Kreisstromes 839
222. Die dynamoelektrische oder Volta-Induction 841
223. F. E. Neumann's Inductionsgesetz, Strompotential, Inductionscoëfficient 844
224. Inductionsströme in Folge momentanen Entstehens und Aufhörens von Strömen oder Magnetismen 848
225. Unterbrechungs-Vorrichtungen 849
226. Inductionsströme durch Entladungen statischer Elektricität 852
227. Die Selbstinduction und der Extrastrom 854
228. Umstände, welche die Wirksamkeit einer Inductionsspirale schwächen oder erhöhen 859
229. Abhängigkeit der elektromotorischen Kraft des Inductionsstromes von der Windungszahl der Spirale; Princip der Transformatoren im Allgemeinen 860
230. Ungleiche elektromotorische Kraft des Schliessungs- und des Oeffnungsinductionsstromes; Disjunctoren 862
231. Der Funkeninductor Ruhmkorff's 867
232. Versuche mit dem Funkeninductor 874
233. Der Inductionsfunken in verdünnten Gasen 878
234. Hittorf's und Crookes' Versuche mit elektrischen Entladungen in sehr stark verdünnten Gasen 883
235. Einwirkung des Magnets auf die elektrische Entladung in verdünnten Gasen 888
236. Alternirende Entladungen in Geissler'schen Röhren 892
237. Einwirkung des Lichtes auf die elektrischen Entladungen 894
238. Die neueren Transformatoren und ihre Anwendung zur elektrischen Beleuchtung 895
239. Inductionsströme höherer Ordnung 902
240. Telephon; Telephonbrücke; Inductionswage 905
241. Mikrophon, Mikro-Tasimeter 913
242. Das Phänomen von Hall 917
243. Theoretisches über das Hall'sche Phänomen; weitere Experimente 921

Siebentes Capitel.

Thermo-Elektricität.

244. Seebeck's Fundamentalversuche 927
245. Die thermo-elektrische Spannungsreihe 929
246. Thermo-elektrisches Verhalten von Legirungen und Mineralien . . 934
247. Einfluss der Temperatur 935

Seite

248. Messung von Temperaturdifferenzen mittelst der Thermo-Elemente . 940
249. Thermoströme in einem Metallstücke 941
250. Thermoströme bei der Berührung kalter und warmer Leiter 943
251. Thermosäulen . 944
252. Peltier's Versuch; Kälteerzeugung durch den elektrischen Strom 950
253. Thermoströme zwischen Flüssigkeiten 958
254. Thermo-elektrisches Verhalten der Flamme 959
255. Theorie der Thermo-Elektricität 960
256. Thermomagnetischer Effect, galvanomagnetische Temperaturdifferenz; Versuche von A. v. Ettingshausen und Nernst 967
257. Elektricitätsentwickelung in Krystallen durch Aenderung von Temperatur und Druck . 972
258. Thermomagnetische Motoren. Edison's pyromagnetischer Motor und Stromgenerator . 976

Achtes Capitel.

Diamagnetismus; Thierische Elektricität; Anhang.

259. Die Grunderscheinungen des Diamagnetismus 979
260. Diamagnetische Polarität 986
261. Theorie des Diamagnetismus 990
262. Diamagnetismus von Flammen und Gasen 992
263. Intensitätsbestimmung magnetischer und diamagnetischer Kräfte . . 994
264. Einfluss der Krystallisation auf die diamagnetischen Erscheinungen 1002
265. Drehung der Polarisationsebene durch magnetisirende Kräfte . . . 1004
266. Gesetze der elektromagnetischen Drehung der Polarisationsebene. Methode zur Messung der Intensität eines Magnetfeldes; Verdet'sche Constante 1009
267. Elektromagnetische Drehung der Polarisationsebene durch dünne Metallschichten; Kundt'sche Constante 1015
268. Thierische Elektricität 1016
269. Allgemeines Gesetz der Nervenerregung durch den elektrischen Strom 1018
270. Der Muskelstrom . 1019
271. Elektrische Fische . 1023
272. Uebersicht des absoluten mechanischen, elektrostatischen und elektromagnetischen Maasssystems 1027
273. Die Dimensionsformeln, ihre Bedeutung und Anwendung 1037
274. Verhältniss des elektrostatischen zum elektromagnetischen Maasssysteme . 1039
275. Das Wesen der Elektricität 1041
Nachträge . 1045
Sachregister . 1048

FÜNFTES BUCH.

DIE

ELEKTRISCHEN ERSCHEINUNGEN.

Bayerische
Staatsbibliothek
München

Erstes Capitel.

Vom Magnetismus.

Anziehung des Eisens durch Magnete. Unter den ver- 1
schiedenen Eisenerzen giebt es eines, welches, aus gleichen Aequivalenten Eisenoxyd und Eisenoxydul nach der Formel $FeO \, . \, Fe_2O_3$ zusammengesetzt, mit dem Namen Magneteisen oder Magneteisenstein bezeichnet wird. Hier und da findet man Stücke dieses Magneteisensteines, welche die Eigenschaft haben, Eisen anzuziehen, was man ganz einfach daran erkennt, dass Eisenfeile oder selbst kleinere Eisenstücke, wie z. B. Drahtstifte, an ihnen hängen bleiben. Auch die als Magnetkies bekannte, nach der Formel $6\,FeS \, . \, Fe_2S_3$ zusammengesetzte Schwefelverbindung des Eisens zeigt diese Eigenschaft. In sehr viel geringerem Grade kommt sie auch dem Kobalt und dem Nickel zu.

Schon den Alten war diese Erscheinung bekannt, und sie nannten solche Eisen anziehende Steine Magnete, weil sie diese auffallende Eigenschaft zuerst an Eisenerzen wahrgenommen hatten, welche in der Nähe der Stadt Magnesia gefunden wurden.

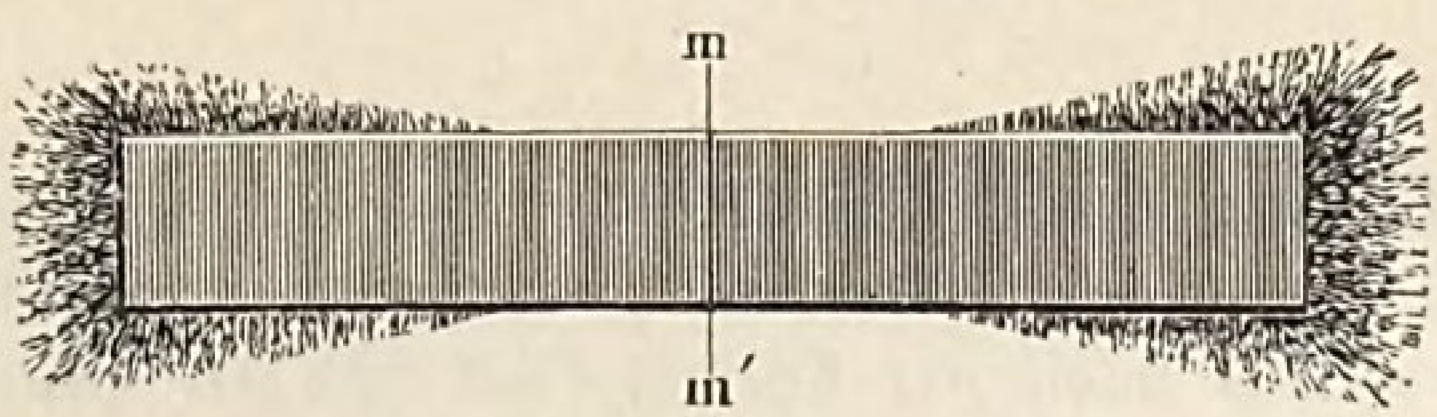
Solche Stücke Eisenerz, welche von Natur die Eigenschaft haben, Eisen anzuziehen, nennt man natürliche Magnete; allein nicht jedes Stück Eisenerz der oben angegebenen Zusammensetzung ist von Natur magnetisch; ja das Magneteisen ist nur ausnahmsweise von Natur magnetisch, wohl aber kann man es fast durchgängig durch verschiedene Methoden, welche später näher beschrieben werden sollen, magnetisch machen.

Ebenso wie den Magneteisenstein kann man auch den Stahl bleibend magnetisch machen, was den grossen Vortheil gewährt, dass man solche künstliche Magnete von beliebiger Gestalt herstellen kann, wie es eben für die verschiedenen Versuche am vortheilhaftesten ist.

Auf den ersten Anblick scheint es, als ob ein Magnet das Eisen in ähnlicher Weise anzöge, wie die Erde jeden schweren Körper anzieht. Dies ist aber nicht der Fall; die Schwerkraft wirkt auf allen Punkten der Erdoberfläche nahezu gleich stark, an jedem Magnet dagegen finden sich zwei Stellen, für welche die Anziehung ein Maximum ist, während zwischen denselben eine andere Stelle gefunden wird, welche gar keine anziehende Wirkung auf Eisen zeigt.

Um dies zu zeigen, wälze man einen Magnet in Eisenfeilspänen herum; beim Herausnehmen wird man dann sehen, wie diese an einzelnen Stellen hängen bleiben und an anderen abfallen; bei natürlichen Magneten zeigt sich diese Erscheinung wegen der meist unregelmässigen Gestalt derselben weniger deutlich als bei künstlichen, denen man zu diesem Zweck am besten die Gestalt eines Stabes giebt. An einem regelmässig magnetisirten Stahlstabe bleibt die Eisenfeile vorzugsweise an den beiden Enden hängen, wie dies Fig. 1 darstellt, während sie in der Mitte ganz abfällt. Die beiden Enden des Magnets, von welchen das Eisen am kräftigsten angezogen wird, heissen wir vorläufig die **magnetischen Pole**, indem wir uns eine schärfere Definition der letzteren auf später vorbehalten. Diejenige rings um den Magnetstab herumlaufende Linie, in welcher man keine magnetische Wirkung beobachtet, wird die **Mittellinie** oder indifferente Zone genannt.

Fig. 1.



Sehr schön zeigt sich die stärkere magnetische Wirkung der Pole auch, wenn man einen Magnetstab mit einem Papierblatt bedeckt und Eisenfeile darauf siebt, ein Versuch, auf den wir später nochmals zurückkommen werden.

2 **Verschiedenheit der Pole, Anziehung und Abstossung derselben.** Die beiden Pole eines natürlichen oder künstlichen Magnets sind keineswegs von gleicher Beschaffenheit. Zunächst zeigen sie sich nicht indifferent gegenüber den Weltgegenden. Um sich davon zu überzeugen, hänge man nur einen Magnetstab so auf, dass seine Längenaxe eine horizontale Linie bildet und **er sich in horizontaler Ebene frei drehen kann**, wie dies z. B. bei dem Magnet Fig. 2 der Fall ist, welcher, in einer Hülse von Papier oder Metall liegend, an einem ungedrehten Faden aufgehängt ist. Noch bequemer zu diesen Versuchen sind **Magnetnadeln**, welche gewöhnlich die Gestalt einer lang gestreckten Raute haben und in der Mitte mit einem Hütchen von Stahl oder Achat versehen sind, welches auf eine Stahlspitze aufgesetzt wird, wie man Fig. 3 sieht.

Eine dritte, in manchen Fällen sehr zweckmässige Art, eine Magnetnadel in horizontaler Ebene leicht drehbar aufzuhängen, ist in den Figuren 4 und 5 dargestellt. Die Mitte der Nadel ist durchbrochen und hier eine etwas lange Messinghülse angesetzt, welche oben durch eine nach unten mit einer Stahlspitze endigende Schraube verschlossen ist. Diese Spitze, welche den Aufhängepunkt der ganzen Vorrichtung bildet, spielt, wie man Fig. 5 deutlicher sieht, auf einem Achatplättchen, welches auf dem Gipfel des Messingsäulchens *m* eingelassen ist.

Ein so aufgehängter Magnet zeigt nun die Eigenthümlichkeit, dass er, falls er nicht durch in der Nähe befindliches Eisen oder andere

Fig. 2.

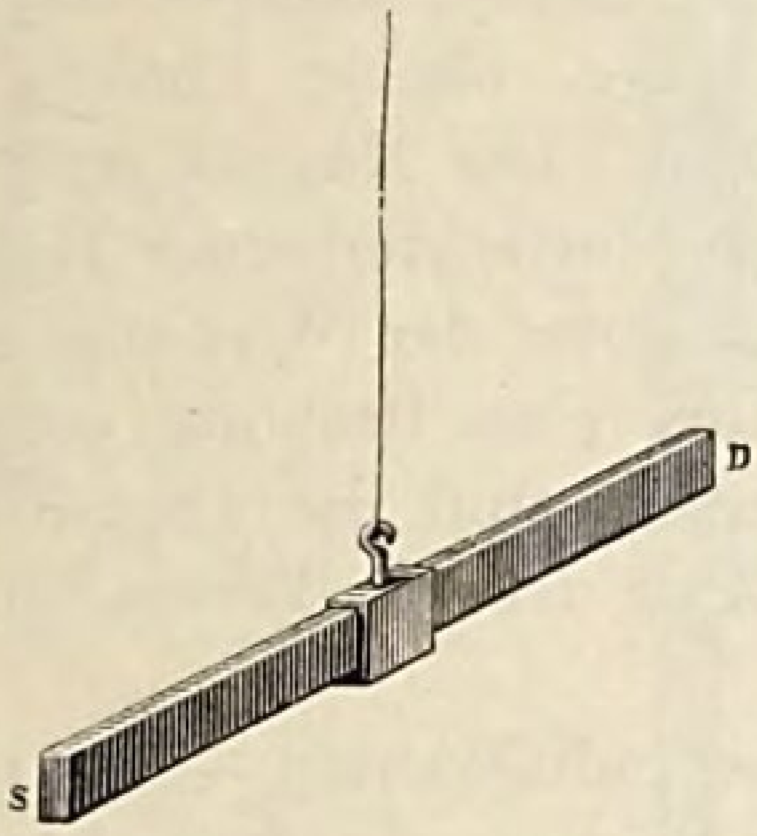


Fig. 3

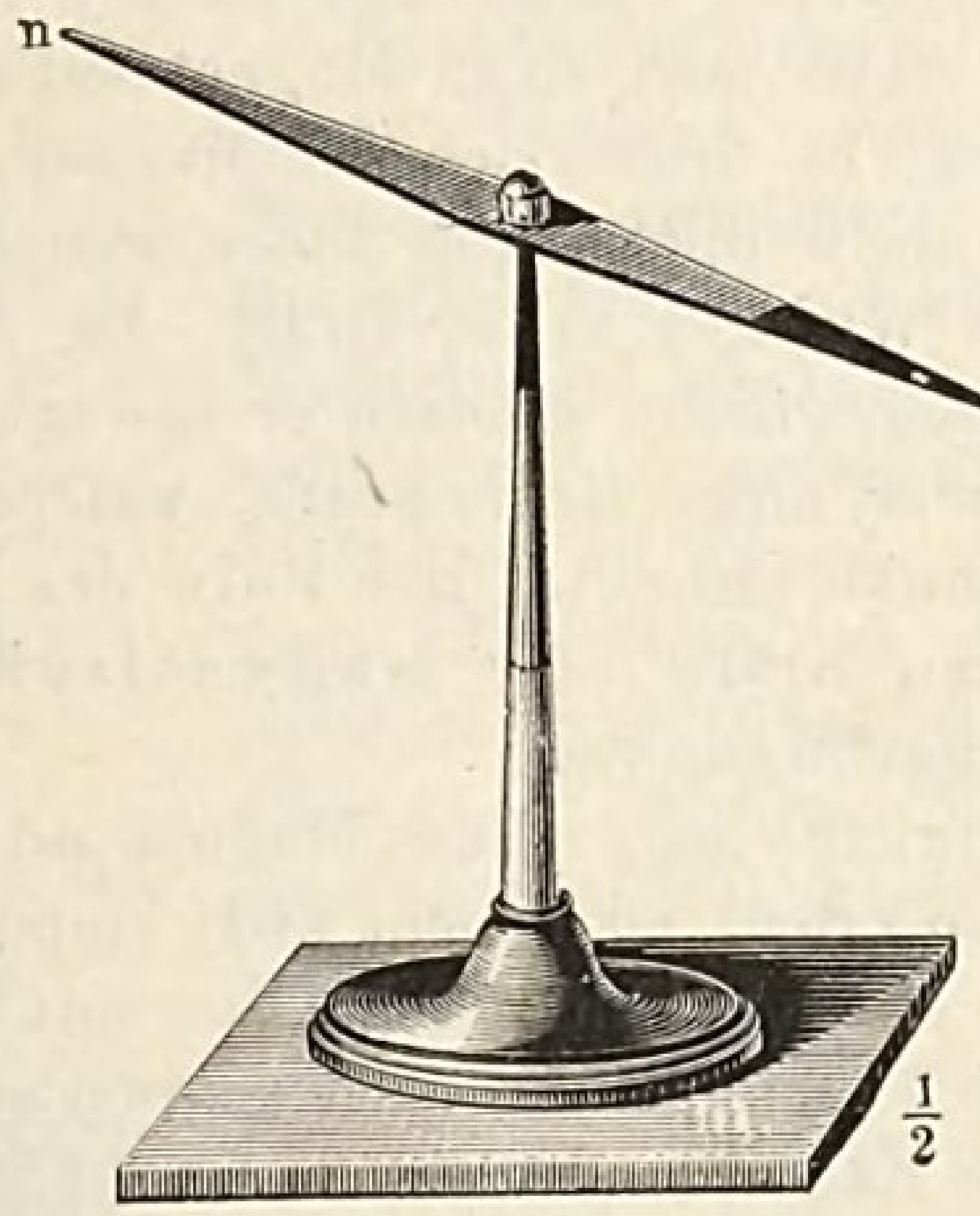


Fig. 4.

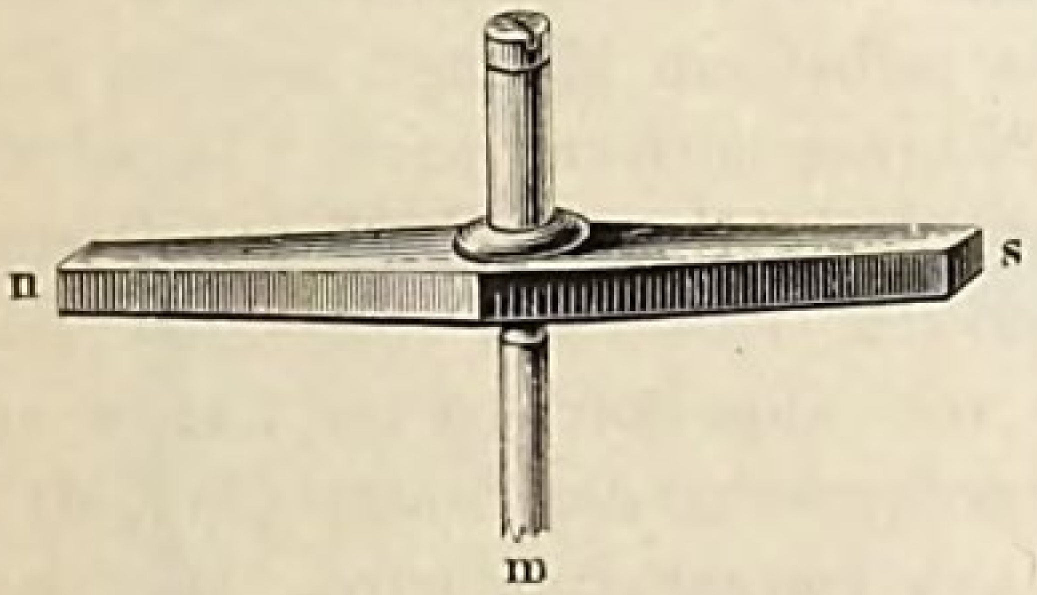
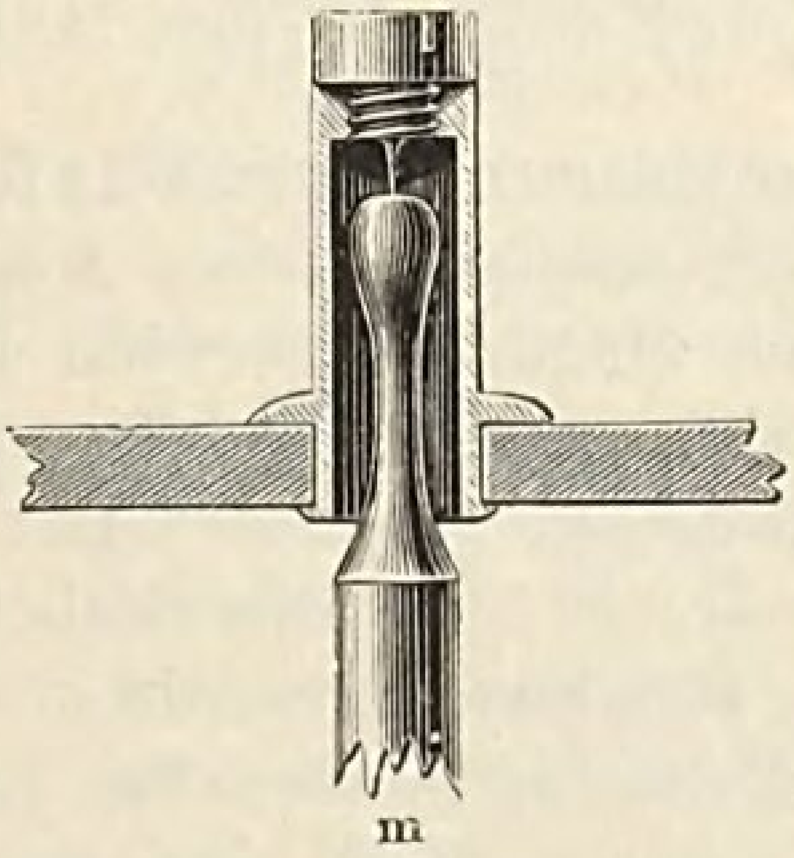


Fig. 5.



Magnete beeinflusst wird, stets ein und denselben von seinen beiden Polen gegen Norden, den anderen Pol gegen Süden richtet. Wir werden später diese Erscheinung ausführlicher untersuchen; vorläufig constatiren wir nur das verschiedene Verhalten der beiden Pole. Es ist gebräuchlich geworden, den nach Norden zeigenden Pol den Nordpol, den anderen den Südpol des Magnets zu nennen.

Hat man auf diese Weise an zwei aufgehängten Magnetstäben die Pole aufgesucht und bezeichnet, so lässt sich eine weitere wichtige Verschiedenheit im Verhalten derselben auf folgende Weise zeigen. Nähert man nämlich einen der Magnete mit dem Nordpol dem Nordpol des frei beweglichen Magnetes, so wird er abgestossen, nähert man ihn dem Südpole desselben, so wird derselbe angezogen. Nähert man dann den Südpol des einen Magnets dem Nordpol des frei beweglichen, so wird derselbe angezogen, nähert man ihn dem Südpol des letzteren, so erfolgt Abstossung. Diese vier Fundamentalversuche lassen sich in die Regel zusammenfassen: Gleichartige Pole stossen sich ab, ungleichartige ziehen sich an. Es stossen sich also ab: Nordpol und Nordpol, Südpol und Südpol. Es ziehen sich an: Nordpol und Südpol. Setzt man einen Magnet auf ein Brettchen, welches auf Wasser schwimmt, so dreht sich der Magnet so lange, bis der Nordpol gegen Norden, der Südpol gegen Süden gerichtet ist. Der Magnet erfährt also nicht die Wirkung einer Kraft, die ihn zu fortschreitender Bewegung veranlassen müsste, sondern er bewegt sich unter der Wirkung zweier Kräfte oder eines Kräftepaars, welches ihm eine Drehung um seinen Schwerpunkt ertheilt. Die Pole des Magnets sind die Angriffspunkte der beiden Kräfte, die magnetische Axe ist die Verbindungslinie dieser Angriffspunkte.

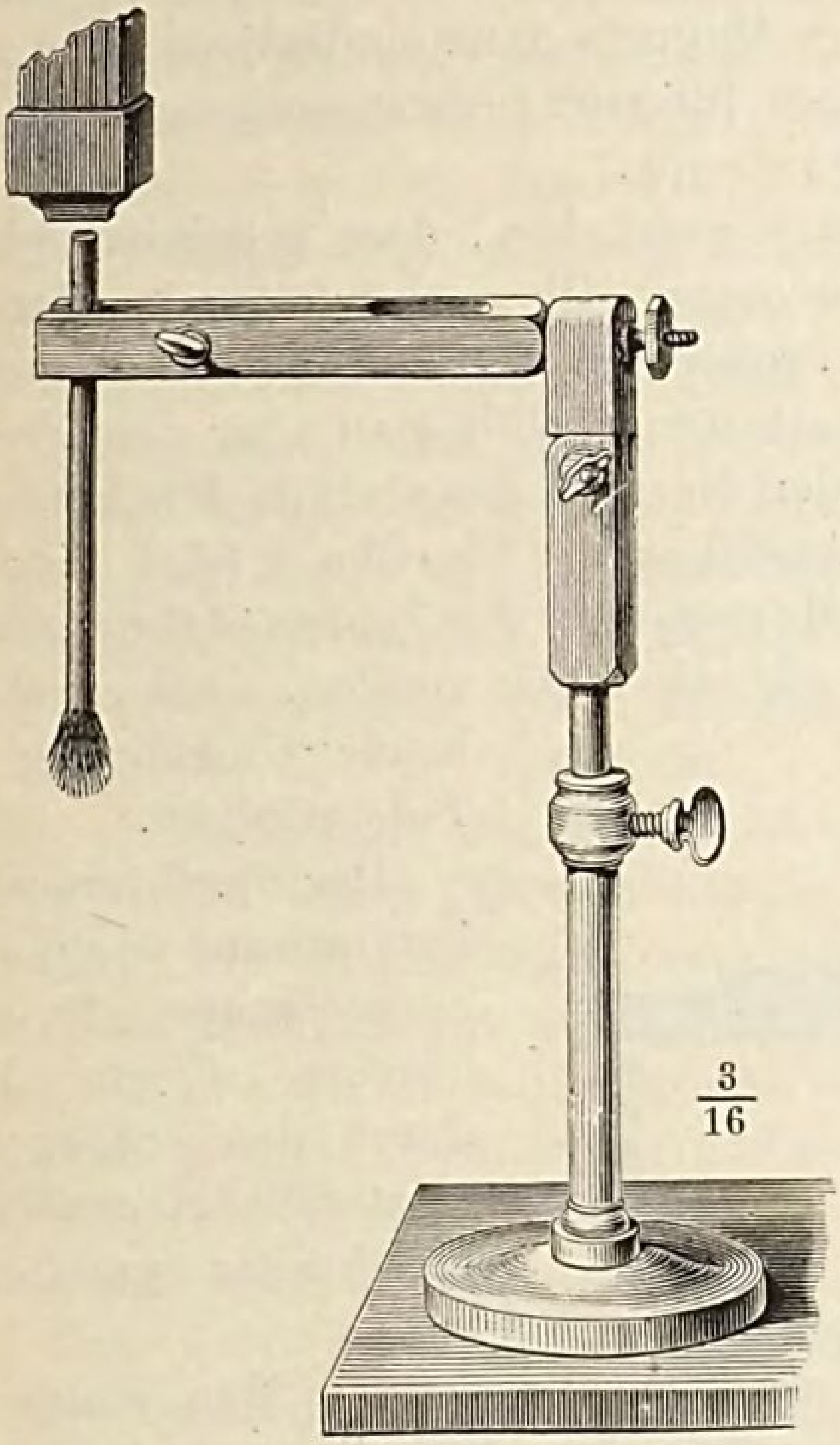
Zerbricht man einen Magnet an der indifferenten Zone in zwei Stücke, so erhält man nicht zwei einpolige Magnete, sondern jedes Stück ist dann ein vollständiger Magnet mit Nord- und Südpol. Der Versuch lässt sich leicht mittelst einer magnetisirten Stricknadel anstellen. Bricht man jede Hälfte noch einmal, so erhält man wiederum lauter Magnete mit je zwei Polen. Es giebt überhaupt keinen Magnet mit nur Einem Pole. Dagegen giebt es, wie wir sehen werden, Magnete mit mehr als zwei Polen und mehr als einer Indifferenzzone.

3 **Magnetisirung durch Influenz.** Jedes Stück weiches Eisen wird durch blosse Annäherung eines Magnets selbst ein Magnet, verliert aber wieder seinen Magnetismus, wenn der Magnet entfernt wird. Diese Erscheinung wird magnetische Influenz oder Induction, auch Magnetisirung durch Vertheilung genannt. Der Versuch kann auf folgende Weise angestellt werden. Ein Eisenstäbchen von ungefähr 15 cm Länge und 6 bis 8 mm Durchmesser werde in ein entsprechendes Stativ (Fig. 6) so eingespannt, dass es in verticaler Richtung festgehalten wird. Hält man nun über das obere Ende den einen Pol eines kräftigen Magnetstabes, während man das untere Ende in ein Schälchen mit Eisenfeile oder kleinen Drahtstiften eintaucht, so bleibt nach der Entfernung des Schälchens ein ganzes Büschel hängen, woraus hervorgeht, dass der Eisenstab unter dem Einfluss des Magnets selbst magnetisch geworden ist; entfernt man aber ganz allmälig den über das Stäbchen gehaltenen Magnetstab, so fallen die Drahtstiftchen ganz allmälig ab und es bleibt kaum

eines hängen, wenn der Magnet vollständig entfernt ist. Der Magnetismus des Eisenstäbchens ist also wieder verschwunden.

Um diesen Versuch mit Erfolg anzustellen, muss man sich hüten, den Magnetpol in unmittelbare Berührung mit dem oberen Ende des Eisenstabes zu bringen, weil man ihn sonst nicht ohne störende Erschütterung entfernen kann; am leichtesten verhindert man diese Berührung, wenn man zwischen das obere Ende des Eisenstäbchens und den darüber gehaltenen Magnetstab ein Kartenblatt hält.

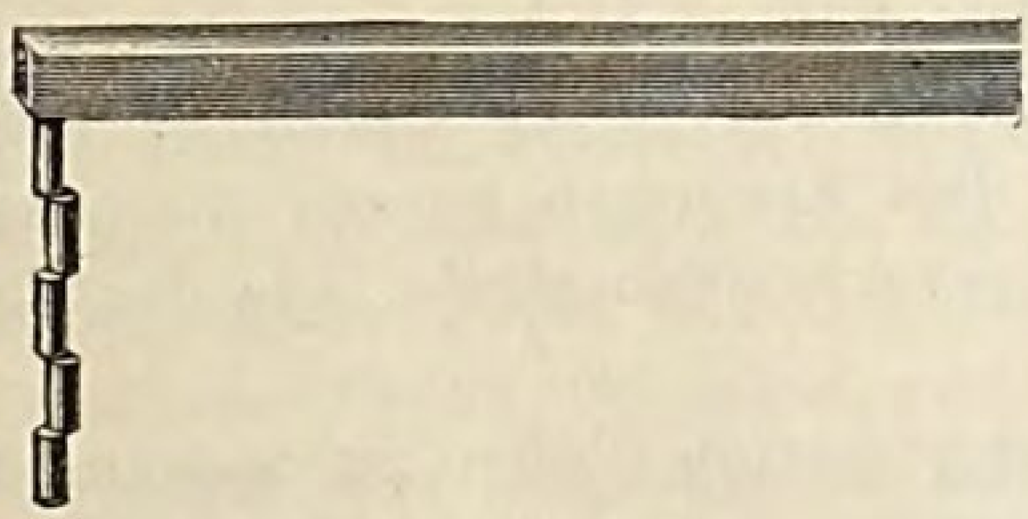
Fig. 6.



3/16

Untersucht man die Pole des durch Influenz entstandenen Magnetes, etwa durch Annäherung einer kleinen schwingenden Magnetnadel, wie Fig. 3 (Probirnadel), an das untere Ende des Stäbchens in Fig. 6, so findet man, dass stets an der dem Nordpol genäherten Stelle des Eisens ein Südpol, überhaupt also ein entgegengesetzter Pol entsteht, während das abgewendete Ende einen gleichnamigen Pol erhält. Da sich nun aber entgegengesetzte Pole anziehen, so muss der durch Influenz entstandene Magnet vom influenzirenden Magnet angezogen werden.

Fig. 7.



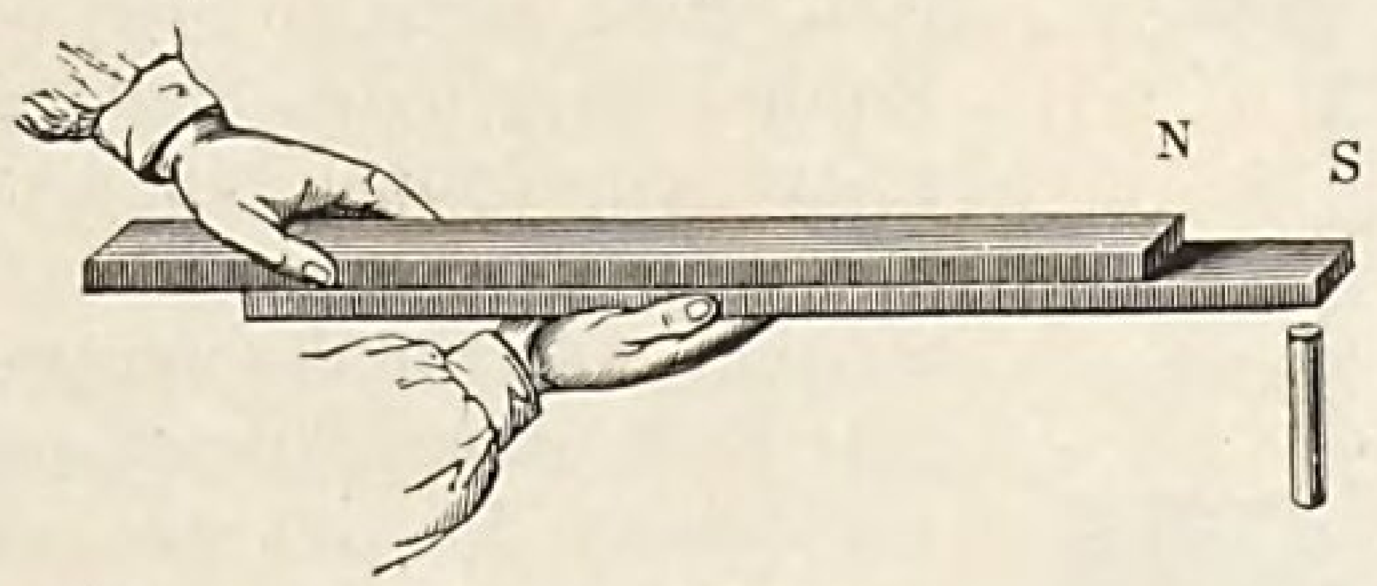
Da der durch Influenz entstandene Magnet selbst wieder als influenzirender Magnet gegenüber einem weiteren Eisenstücke auftreten kann, so erklärt sich die Erscheinung, dass an einen starken Magnet eine ganze Reihe von weichen Eisenstücken und zwar eines an das andere angehängt werden können, wie Fig. 7 zeigt. Ist hierbei beispielsweise der influenzirende Pol ein Nordpol, so kehren alle einzelnen Stäbe nach oben den Südpol, nach unten den Nordpol. Auf diesem Principe beruht auch die Entstehung des Bartes aus feiner Eisenfeile, Fig. 1.

Ein Magnet wirkt jedoch nicht bloss auf unmagnetisches Eisen

influenzirend ein, sondern auch auf einen anderen Magnet. Nimmt man zum Beispiel bei dem in Fig. 6 dargestellten Versuche statt des unmagnetischen Eisenstäbchens ein Magnetstäbchen und nähert diesem den Pol des starken Magnets von oben, so wird der erstere Magnet entweder geschwächt oder gestärkt, je nachdem die vorhandenen Pole mit denjenigen entgegengesetzt oder gleichartig sind, welche durch die Influenz hervorgerufen werden. Es kann unter Umständen der vorhandene Magnetismus des schwächeren Magnets ganz neutralisirt oder sogar umgekehrt werden, indem die durch Influenz hervorgerufenen Pole über die ursprünglich vorhandenen überwiegen.

Auf diese Weise kann es auch geschehen, dass scheinbar gleichartige Pole sich anziehen statt abstossen. Dies zeigt folgender Versuch. Nähert man dem Nordpol einer Probenadel den Nordpol eines starken Magnets allmälig, so wird er abgestossen. Hält man aber den Nordpol der Probenadel fest und nähert den Nordpol des starken Magnets nahe bis zur Berührung, so erfolgt Anziehung. Dieselbe erfolgt aber nur, weil durch die starke Influenz der Magnetismus der Probenadel umgekehrt wurde. Auf diese Weise kann, wie wir hören werden, auch eine bleibende Umkehrung der Pole erfolgen.

Fig. 8.



Der durch einen Pol hervorgerufene Influenzmagnetismus eines Stückes Eisen kann durch den entgegengesetzten Pol eines zweiten gleichzeitig genäherten Magnets theilweise oder ganz aufgehoben werden.

Fig. 8 erläutert einen diesbezüglichen Versuch. Man hänge ein Eisenstäbchen an dem einen Pol, etwa dem Südpol eines horizontal gehaltenen Magnetstabes an, so wird das obere Ende des Stäbchens zu einem Nordpol, das untere zu einem Südpol. Wenn man nun aber einen zweiten Magnetstab so auf dem ersteren vorschiebt, dass sich der Nordpol N des oberen allmälig dem Südpol S des unteren nähert, so wird alsbald das bisher getragene Stück Eisen abfallen, weil der Nordpol N des oberen Magnets in dem Eisenstab gerade die entgegengesetzte magnetische Vertheilung hervorzurufen strebt, wie der Südpol S des unteren.

Die beiden mit ihren entgegengesetzten Polen zusammengelegten Magnete haben demnach nach aussen ihre magnetische Kraft eingebüsst, dagegen ist jeder einzelne von ihnen stärker magnetisch geworden, denn jeder Pol stärkt durch Influenz den ihm benachbarten entgegengesetzten Pol. Man unterscheidet deshalb zwischen dem freien Magnetismus, dessen Wirkung nach aussen geht, und dem gebundenen Magnetismus, der im Inneren eines Magnets oder eines Systems von Magneten

entwickelt ist. Legt man die beiden Magnete mit den gleichen Polen zusammen, so vermehrt man den freien Magnetismus, vermindert aber den gebundenen.

Entstehung permanenter Magnete. Wiederholt man den durch Fig. 6 versinnlichten Versuch mit einem frisch gehärteten Stahlstab, d. h. mit einem solchen, der glühend gemacht und dann in kaltem Wasser abgelöscht worden ist, so bleiben nur wenige Feilspänchen an dem unteren Ende hängen, der Stahlstab wird also nicht so leicht magnetisch wie ein Eisenstab. Er nimmt den Magnetismus erst an, wenn er längere Zeit mit dem Magnetpol in Berührung bleibt oder noch besser, wenn man ihn mit einem Magnetpole wiederholt bestreicht. Ein so magnetisch gemachter Stahlstab verliert aber seinen Magnetismus nicht mehr, wenn auch der magnetisirende Pol entfernt wird, der gehärtete Stahl nimmt also einen bleibenden (permanenten) Magnetismus an, was beim weichen Eisen nicht der Fall ist. 4

Die Kraft, mit welcher der gehärtete Stahl einer Aenderung seines jeweiligen magnetischen oder unmagnetischen Zustandes widersteht, heisst man seine Coërcitivkraft.

Die Coërcitivkraft des Stahls ist theils von der Stahlsorte, theils von dem Grade seiner Härte abhängig. Es giebt Stahlsorten, welche keine Spur von Magnetismus annehmen. Wenn glühender Stahl in kaltem Wasser abgelöscht wird, so wird er äusserst hart und spröde; in diesem Zustande ist seine Coërcitivkraft am grössten. Wird nun solcher Stahl gelinde erwärmt, angelassen, wie man es nennt, so verliert er einen Theil seiner Härte, zugleich aber auch einen Theil seiner Coërcitivkraft, und zwar von beiden um so mehr, je stärker er erwärmt wird. Den Grad des Anlassens beurtheilt man bekanntlich nach der Farbe der Oxydschicht, mit welcher sich blanker Stahl beim Erwärmen überzieht. Zuerst geht die natürliche Metallfarbe in Strohgelb über, bei zunehmender Hitze wird sie orange, dunkelorange, violettroth, dann lebhaft blau, worauf ein lebhaftes Grünlich-blau, die Wasserfarbe, folgt. Die erste dieser Nüancen entspricht ungefähr einer Temperatur von 200^0, die letzte, die Wasserfarbe, einer Temperatur von 450^0. Ein gehärteter Stahlstab, welcher bis zum Rothglühen erwärmt wird und dann allmälig erkaltet, hat seine Härte und seine Coërcitivkraft verloren und verhält sich fast ganz so wie weiches Eisen.

In früheren Zeiten, wo man zum Magnetisiren nur Stahlmagnete anwandte, hatte das Magnetisiren harter Stahlstäbe grosse Schwierigkeiten, weil die verhältnissmässig schwachen magnetisirenden Kräfte, die man anwenden konnte, nicht hinreichten, die starke Coërcitivkraft hinlänglich zu überwinden, um eine bedeutende magnetische Vertheilung im Stahlstab zu bewirken; deshalb wählte man früher für Stahlmagnete stärker angelassene, also weichere Stahlstäbe und zwar meistens bis zum Blau (wie die Uhrfedern) angelassene.

Jetzt liefert uns der Elektromagnetismus Mittel, selbst sehr harte Stahlstäbe bis zu ihrer Sättigung zu magnetisiren. Die glasharten Stahlmagnete nehmen aber nur dann mehr permanenten Magnetismus an, als die angelassenen, wenn sie nicht von gestreckter Gestalt sind (kurze dicke Stäbe, Ringe, Stahlspiegel). Für gestreckte Magnete werden die glasharten Stäbe von den angelassenen übertroffen und auch da wiederum die gelb angelassenen von den blau angelassenen. Der für die Stärke des permanenten Magnetismus günstigste Härtegrad hängt aber ausser von dem Dimensionsverhältniss auch von der Stahlsorte ab.

Eine ganz andere und für wissenschaftliche Zwecke wichtigere Aufgabe ist die Herstellung möglichst haltbarer Magnete, welche nicht unter dem Einflusse von Temperaturänderungen, mechanischen Stössen oder der Zeit allein ihren magnetischen Zustand fort und fort ändern. Gerade hierzu sind glasharte Stäbe am wenigsten zu brauchen. Wird ein glasharter zum Maximum magnetisirter Stahlstab auf etwa 100^0 erwärmt, so nimmt sein Magnetismus im Verlaufe von vielen Stunden aus zweierlei Gründen ab, einmal weil das Material sich ändert, dann weil die Coërcitivkraft bei 100^0 geringer ist, als bei gewöhnlicher Temperatur. Die erstere Aenderung findet erst nach vielen Stunden eine Grenze, die letztere Aenderung schon nach viel kürzerer Zeit. Nach den eingehenden Untersuchungen von V. Strouhal und C. Barus*) erhält man recht haltbare Magnete, indem man sie nach dem Härten mindestens durch 20 bis 30 Stunden (mit oder ohne Unterbrechungen ist gleichgültig) in den Dampf siedenden Wassers einsetzt, dann bis zur Sättigung magnetisirt, dann nochmals etwa fünf Stunden dem Wasserdampf aussetzt. Der Magnet befindet sich dann in dem der Temperatur 100^0 entsprechenden Grenzzustande; er ist zwar merklich schwächer, als wenn er nicht erwärmt worden wäre, wird aber in seinem Magnetismus von allen 100^0 nicht übersteigenden Temperaturänderungen nicht dauernd beeinflusst und ist auch gegen mechanische Einflüsse sehr wenig empfindlich.

Das magnetische Verhalten des Magneteisensteins ist fast ganz dasselbe, wie das des gehärteten Stahls, d. h. er ist fähig, bleibenden Magnetismus anzunehmen, aber nur einzelne Exemplare gewisser Fundorte sind schon von Natur polarmagnetisch. Das in Octaëdern krystallisirte Magneteisen von Pfitsch in Tyrol fand Greiss frei von Coërcitivkraft**), so dass also das Verhalten solcher Octaëder ganz mit dem des ausgeglühten Stahls und des weichen Eisens übereinstimmt.

Elias hat gefunden, dass bei gleichem Gewichte ein kurzes und dickes Stück Magneteisenstein einen stärkeren Magnetismus annimmt, als ein ähnliches Stück Stahl; in langen und dünnen Stücken dagegen hat letzterer entschieden die Oberhand.

*) Wiedem. Ann. XX, 662 (1883).

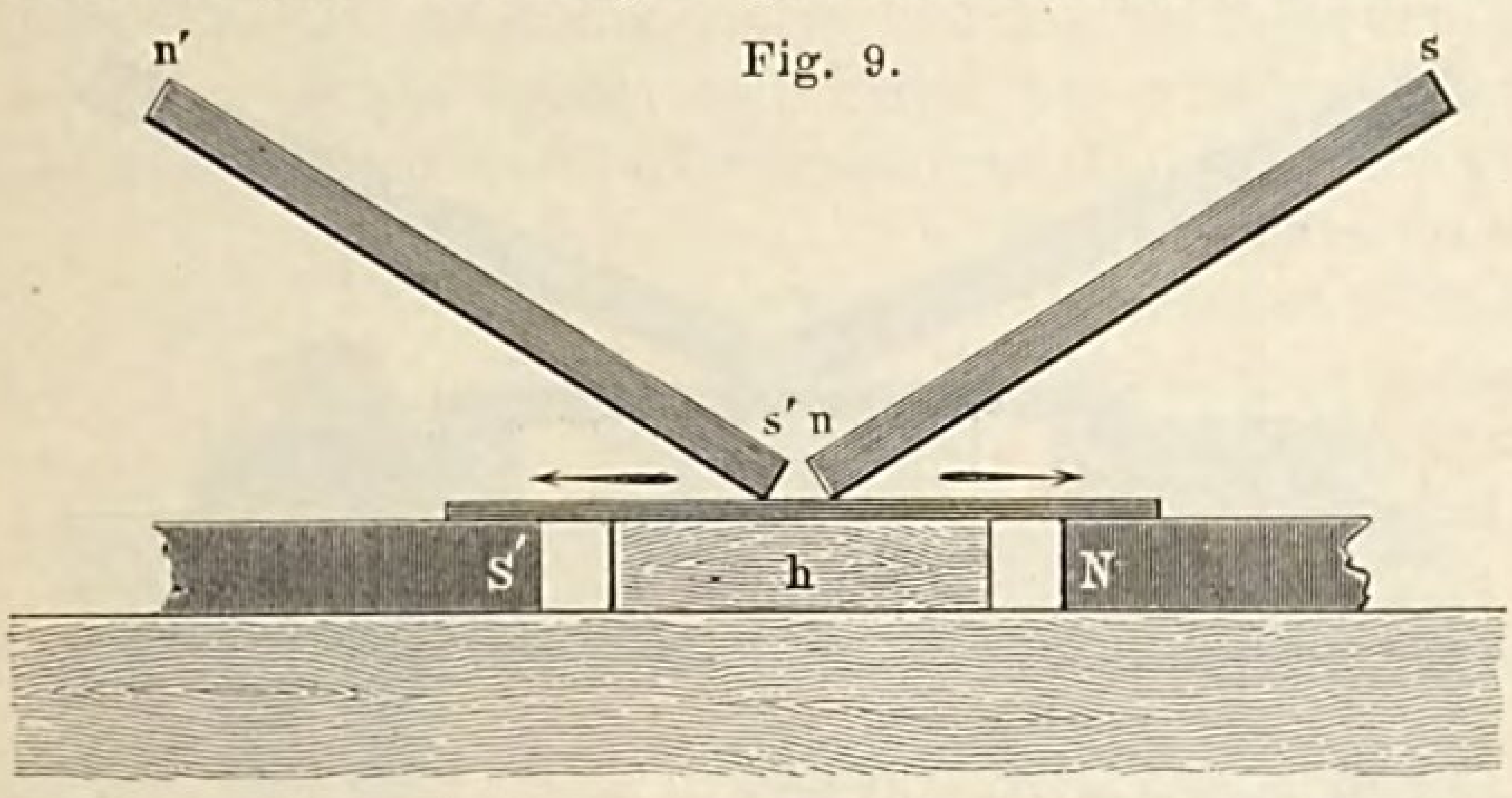
**) Pogg. Ann. XCVIII.

Vor einigen Jahren hat man die Entdeckung gemacht, dass Gusseisen, und namentlich das graue, durch Härten gleichfalls eine bedeutende Coërcitivkraft erhält, dass es sich also gleichfalls zur Darstellung künstlicher Magnete verwenden lässt.

Das vollständig stahlfreie, das ist kohlenstofffreie weiche Eisen hat keine Coërcitivkraft, kann also keinen permanenten Magnetismus annehmen. Da es aber schwer hält, solches Eisen aufzutreiben, da dasselbe fast immer Spuren von Stahl enthält, so findet man auch fast immer nach vorübergehender Magnetisirung Spuren zurückbleibenden Magnetismus.

Methoden zur Herstellung von Stahlmagneten. Um dünnere Stahlstäbchen zu magnetisiren, verfährt man ganz einfach so, 5
dass man das Stäbchen seiner ganzen Länge nach stets in derselben Richtung mit einem und demselben Pol eines kräftigen Magnets streicht, oder noch besser, dass man die eine Hälfte des Stäbchens von der Mitte gegen das eine Ende hinfahrend an dem einen, die andere Hälfte in gleicher Weise an dem anderen Pol des Magnets streicht. Das Ende der an dem Nordpol gestrichenen Hälfte wird natürlich ein Südpol, das Ende der anderen, an dem Südpole gestrichenen Hälfte wird ein Nordpol.

Fig. 9.

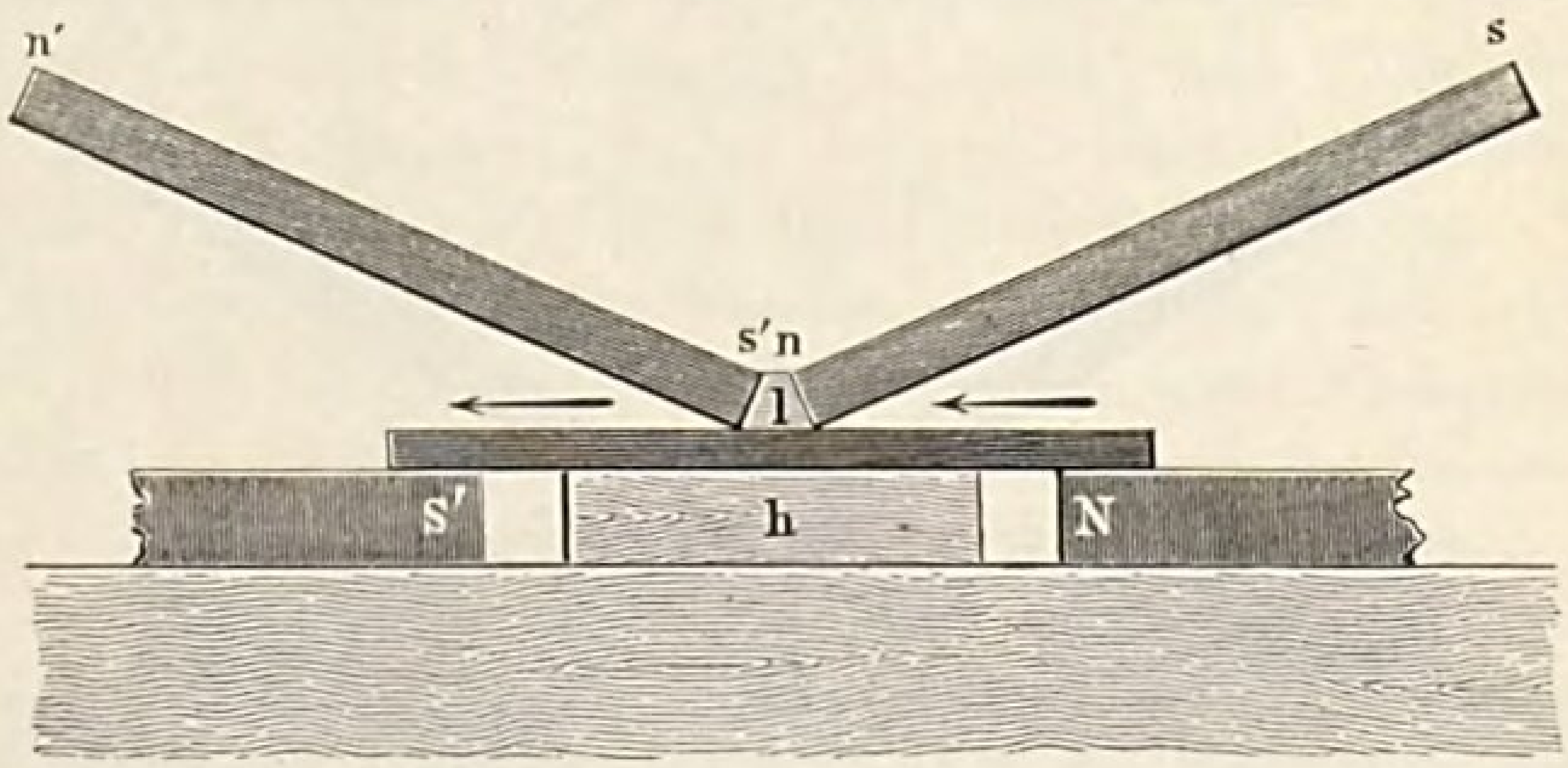


Um stärkere Stäbe zu magnetisiren, wendet man die von Duhamel angegebene Methode des getrennten Striches an; sie besteht darin, dass man zwei starke Magnetstäbe (oder Magnetbündel von der im nächsten Paragraphen zu beschreibenden Art) so legt, dass die Axe des einen Bündels in die Verlängerung der Axe des anderen zu liegen kommt, und dass die entgegengesetzten Pole einander zugekehrt sind, wie man Fig. 9 sieht, wo N den Nordpol des einen, S' den Südpol des anderen Stabes darstellt. Das zu magnetisirende Stäbchen legt man nun so, wie man in der Fig. 9 sieht, und unterstützt es in der Mitte noch durch ein Holzstück h, auf welchem man es auch noch befestigen kann, damit keine Verrückung möglich ist. Nun nimmt man die beiden Streichmagnete ns und $n's'$, den einen in die rechte, den anderen in die linke Hand, setzt sie 25 bis 30° gegen die Horizontale geneigt in der Mitte

des zu magnetisirenden Stabes auf, streicht alsdann mit langsamer regelmässiger Bewegung von der Mitte aus gegen die Enden, so dass die Magnetstäbe $n s$ und $n' s'$ gleichzeitig an den entgegengesetzten Enden des zu magnetisirenden Stäbchens ankommen; hier hebt man sie ab, setzt wieder in der Mitte auf und wiederholt dann dasselbe Verfahren mehrere Male. Es versteht sich von selbst, dass die Streichmagnete so auf die Nadel aufgesetzt werden müssen, dass n gegen N und s' gegen S' hingeführt wird. Diese Methode ist besonders geeignet, um Magnetnadeln für Bussolen oder Stahlstäbe, welche nicht mehr als 4 bis 5 mm dick sind, regelmässig und vollständig zu magnetisiren.

Für Stäbe, welche mehr als 4 bis 5 mm dick sind, ist die Methode unzureichend, und man wendet in solchen Fällen die von Aepinus herrührende Methode des Doppelstriches an. Der Doppelstrich wird folgendermaassen ausgeführt. Man legt den zu magnetisirenden Stab auf dieselbe Weise zwischen zwei Magnetbündel wie bei Duhamel's Methode, und setzt auch die beiden Streichmagnete auf dieselbe Weise in der Mitte auf, nur giebt man ihnen eine noch geneigtere Stellung, so dass sie nur einen Winkel von 15 bis 20° mit der Horizontalen machen.

Fig. 10.



Alsdann streicht man mit ihnen nicht nach den entgegengesetzten Polen, sondern man bewegt beide nach demselben Stabende hin, alsdann zurück den ganzen Stab entlang. Nachdem man sie auf diese Weise zusammen hinlänglich oft über den Magnet hin und her geführt hat, hebt man sie von der Mitte des Stabes wieder ab. Auf jeden Fall muss zwischen den unteren Enden der Streichmagnete ein Zwischenraum von 5 bis 6 mm sein, den man am besten durch ein Stückchen Holz, Messing oder Blei sichert, welches in Fig. 10 durch l bezeichnet ist.

Der Doppelstrich giebt einen starken Magnetismus; er darf aber zum Magnetisiren von Nadeln für Bussolen und Stäbe, welche zu genauen Untersuchungen dienen sollen, nicht angewendet werden, weil er fast immer an den Enden ungleich starke Pole giebt und gleichzeitig Folgepunkte veranlasst.

Mit dem Namen der Folgepunkte bezeichnet man nämlich magnetische Pole, welche nicht am Ende eines magnetisirten Stabes, sondern

an beliebigen Zwischenpunkten sich zeigen und welche stets die Folge einer unregelmässigen Magnetisirung sind; sie treten nämlich dann auf, wenn einzelne Stücke der Längenausdehnung des Stabes in entgegengesetzter Richtung magnetisirt sind, und zeigen dann stets die Stellen, an welchen ein Polaritätswechsel stattfindet. Man kann solche Folgepunkte am einfachsten dadurch erkennen, dass man den Stab in Eisenfeile wälzt, wobei dann an allen Folgepunkten stärkere Büschel hängen bleiben, oder auch dadurch, dass man ein starkes Papierblatt auf den Magnetstab legt und Eisenfeile darauf siebt, wobei dann ein mit Folgepunkten versehener Magnetstab eine der in Fig. 11 abgebildeten ähnliche Anordnung giebt.

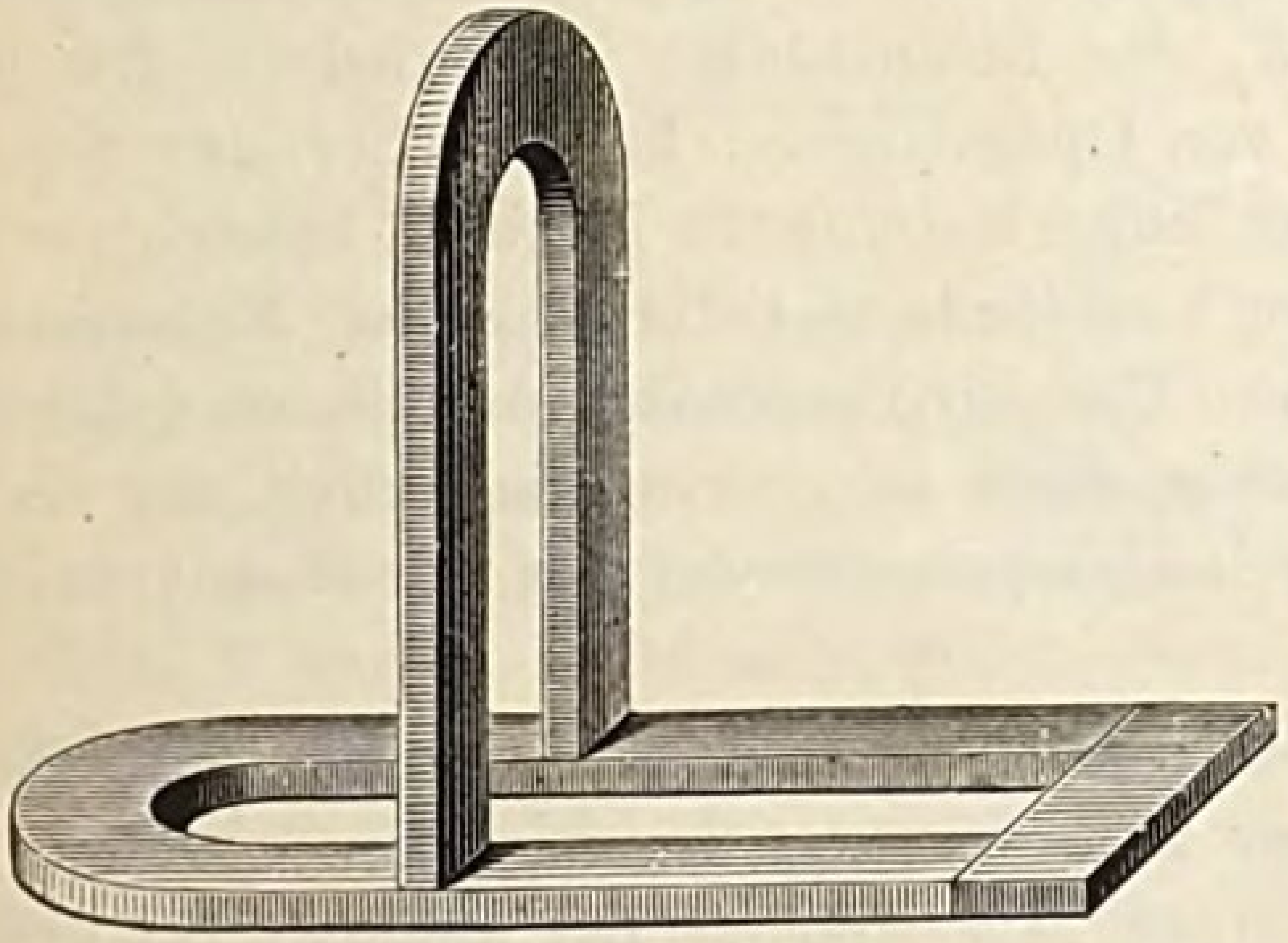
Fig. 11.



Es versteht sich von selbst, dass Magnetnadeln frei von Folgepunkten sein müssen.

Um hufeisenförmige Magnete herzustellen, bedient man sich am besten der Hoffer'schen Methode, welche darin besteht, dass man an die beiden freien Enden des zu magnetisirenden, horizontal gelegten Hufeisens, welche die Pole werden sollen, eine Platte von weichem Eisen anlegt, wie Fig. 12 zeigt, einen hufeisenförmigen Streichmagnet, welcher gleiche Breite mit dem zu magnetisirenden haben muss, am Bogen aufsetzt, und ihn dann parallel mit sich selbst gegen die Enden hin streicht.

Fig. 12.



In Ermangelung eines Streichmagnets von der gleichen Breite des neu herzustellenden kann man auch den einen Schenkel des Hufeisens zuerst mit dem einen, dann den anderen Schenkel mit dem anderen Pol eines kräftigen Magnetstabes streichen, noch vortheilhafter aber wendet man die Methode des Kreisstriches an, d. h. man streicht mit einem und demselben Pole des Streichmagnets zuerst auf dem einen Schenkel vom Bogen bis zum Ende, dann ohne Unterbrechung auf der weichen Eisenplatte fort zum Ende des anderen Schenkels, auf diesem weiter bis zum Bogen, über den Bogen weg und so weiter, immer den magnetisirenden Pol im Kreise herum führend. Dieselbe Operation wird dann auf der anderen Seite der Stahlplatte wiederholt.

Noch bequemer lässt sich die Operation des Kreisstriches ausführen, wenn man statt der Eisenplatte ein dem ersteren ganz gleiches Hufeisen an die Enden desselben ansetzt. Man erhält auf diese Weise gleich zwei Hufeisenmagnete.

Die auf Anwendung des elektrischen Stromes beruhenden Magnetisirungsmethoden werden wir später kennen lernen.

6 **Potentielle Energie des Magneten.** Ein Stahlstab erhält, indem man ihn magnetisirt, die Fähigkeit, eine Arbeit zu leisten, z. B. ein Eisenstück in die Höhe zu ziehen. Diese Fähigkeit, eine Arbeit zu leisten, wird Energie genannt (Bd. I, S. 255) und zwar in diesem Falle potentielle Energie, weil sie durch die Lage der Theile und nicht durch die lebendige Kraft des bewegten Körpers gegeben ist. Während der magnetisirte Stab Magnetismus und damit Energie aufnimmt, giebt der magnetisirende Stab seinen Magnetismus und seine daraus folgende Energie durchaus nicht ab. Es könnte also bei oberflächlicher Betrachtung scheinen, dass hier Energie nicht übertragen, sondern aus Nichts erzeugt werde, so dass also eine Ausnahme vom Gesetze der Erhaltung der Energie vorliege. Damit wäre dann auch die Möglichkeit eines „Perpetuum mobile“ gegeben. Man denke sich z. B. folgenden Vorgang: Auf dem Stahlstab NS (Fig. 13) werde der Pol N' des Magnets $N'S'$ von der Mitte gegen das Ende S bewegt, dann wieder zurück zur Mitte. Hierdurch wird der Stab NS magnetisch und hebt das Eisenstück e empor. Darauf bewegt man N' gegen N (oder nach Umkehrung der Pole S' nach S) und entmagnetisirt dadurch wieder den Stab NS; das Eisenstück e fällt nieder. Bei jeder Wiederholung dieser Reihe von Operationen, bei welcher der Schwerpunkt des Magneten $N'S'$ gar keine Hebung zu erfahren braucht, würde ein Arbeitsquantum gewonnen, welches der Hebung der Eisenmasse e um die Höhe bis S entspricht. Um das Perpetuum mobile zu vollenden, erscheint daher nur mehr nöthig, diese so gewonnene Arbeit zur Ueberwindung der Reibung bei der horizontalen Bewegung des Magneten $N'S'$ zu verwenden.

Bei dieser Schlussweise übersieht man, dass die horizontale Bewegung des Magneten ausser der Reibung, von der wir ganz absehen, mit einem Arbeitsaufwand verbunden ist, welcher der anderweitig gewonnenen Energie äquivalent ist.

Würde man den Magneten $N'S'$ auf einer nicht magnetisirbaren Unterlage, z. B. einer horizontalen Glasplatte, hin und her führen, so würde allerdings (ausser der Reibung) kein Arbeitsaufwand dazu erforderlich sein. So aber entstehen sofort unter dem bewegten Magnete im Stahlstabe Magnetpole, welche auf die Bewegung des Magnets $N'S'$ vorherrschend hemmend einwirken. So wird z. B. beim Zurückgehen zur Mitte der Pol N' von dem eben entstandenen Pole S zurückzuhalten gesucht. Wiederholt man die Bewegung des Poles N' von der Mitte

gegen das Ende S und zurück zur Mitte, so wird allerdings bei der Annäherung von N' an S Arbeit gewonnen, aber zur Rückbewegung noch mehr Arbeit aufgewendet. Dies dauert so lange, bis der Stab so weit magnetisirt ist, als er es auf diese Weise werden kann. Erst von da an halten sich die bei diesen Bewegungen gewonnenen und aufgewendeten Energiemengen das Gleichgewicht. Soll nun aber das Eisenstück wieder zum Fall gelangen, so muss der Stab entmagnetisirt, der Pol N' dem abstossenden Pole N genähert werden. Man sieht also, dass die Energie der fallenden Eisenmasse nicht umsonst zu erhalten ist und dass die in einem Magneten schlummernde potentielle Energie nur das Aequivalent der beim Magnetisiren aufgewandten actuellen Energie ist.

Wir wollen noch folgenden Fall in Betrachtung ziehen: der Magnetstab NS, Fig. 14, sei um eine horizontale Axe drehbar und befinde sich im indifferenten Gleichgewichte. Unter seinem Pole N befinde sich befestigt der Stab E aus weichem Eisen und in geringem Abstande unter diesem das freibewegliche kleinere Eisenstück e. Wird nun der Magnetstab mit dem Pole N abwechselnd gesenkt und gehoben, so wird

Fig. 13.

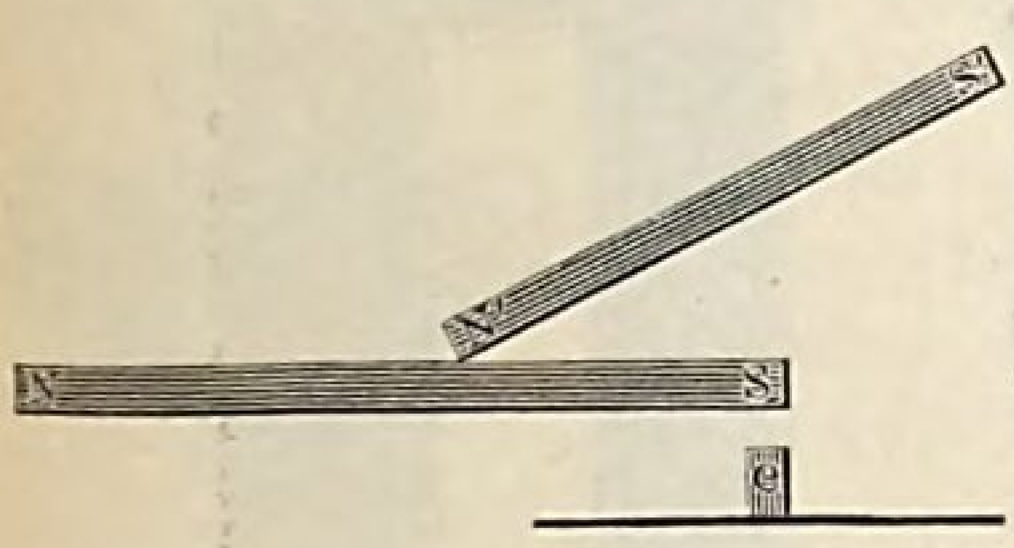
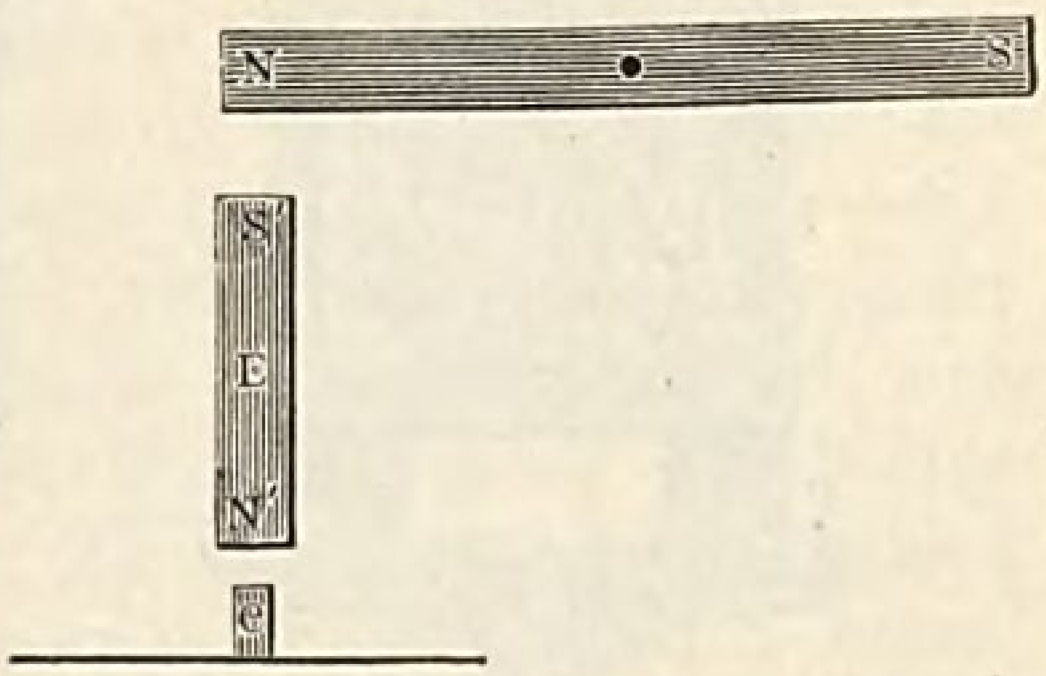


Fig. 14.



abwechselnd der Stab E magnetisch und unmagnetisch, daher das kleinere Eisenstück e abwechselnd gehoben und wieder fallen gelassen. Man könnte nun glauben, dass beim Senken von N ebenso viel Arbeit gewonnen, als beim Heben aufgewendet wird, da die anziehende Kraft zwischen N und E beide Male gleich gross sei, dass mithin die Energie des fallenden Eisenstückes e gratis zu erhalten sei.

Allein es ist leicht einzusehen, dass zum Abziehen des Pols N von E mehr Arbeit aufgewendet werden muss, als beim Niedersenken gewonnen wird. Der Pol N wird nicht bloss von dem durch Influenz entstandenen Pole S' angezogen, sondern auch von dem Pole N' abgestossen. Ist aber von letzterem das Eisenstück e angezogen, so wird ein Theil des freien Magnetismus von N' gebunden. Die Abstossung von N' wirkt daher nicht mehr in gleichem Grade unterstützend mit, während N steigt, als sie entgegenwirkt, während N sinkt. Es ist daher zum Heben von N ein Mehraufwand von Energie erforderlich und dieser kommt dann im fallenden Eisenstücke wieder zum Vorschein.

Ausserdem ist zu beachten, dass bei abwechselndem Magnetisiren

und Entmagnetisiren von Eisen und Stahl auf Kosten aufgewendeter Energie Wärme entwickelt wird*).

7 **Magnetische Armaturen** nennt man eiserne Ansatzstücke oder eiserne Fassungen, mit welchen natürliche oder künstliche Magnete versehen werden, um ihren Magnetismus in zweckmässiger Weise zur Wirkung zu bringen.

So wird z. B. an jede der Polflächen eines natürlichen Magnets eine ungefähr 2 mm dicke Eisenplatte (die Flügel l und l', Fig. 15 und Fig. 16) angelegt und durch messingene Bänder befestigt, welche unten in den hervorragenden Eisenstücken p und p', den Füssen, enden. Durch die magnetisirende Wirkung, welche der natürliche Magnet auf diese angelegten Eisenstücke ausübt, werden nun die Füsse p und p' in entgegengesetzte Pole verwandelt, deren magnetische Kraft sich besser ver-

Fig. 15.

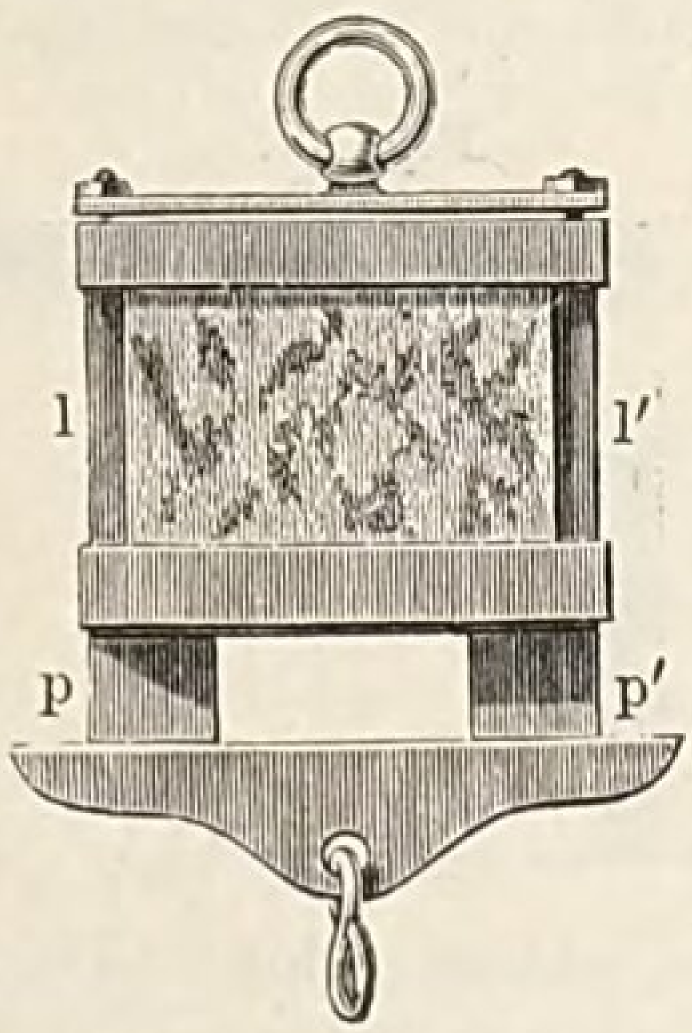


Fig. 16.

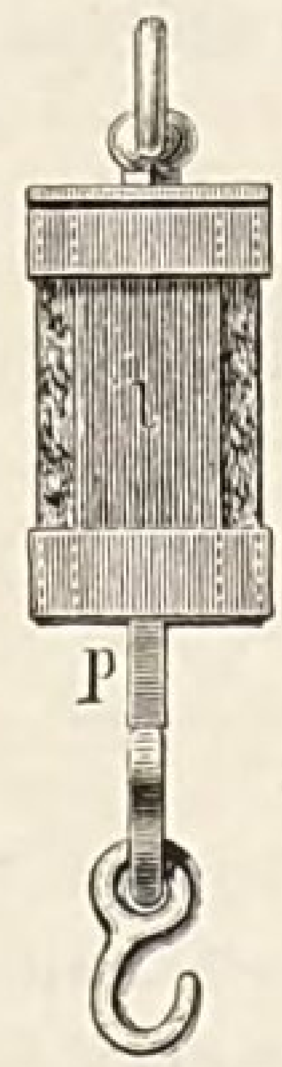
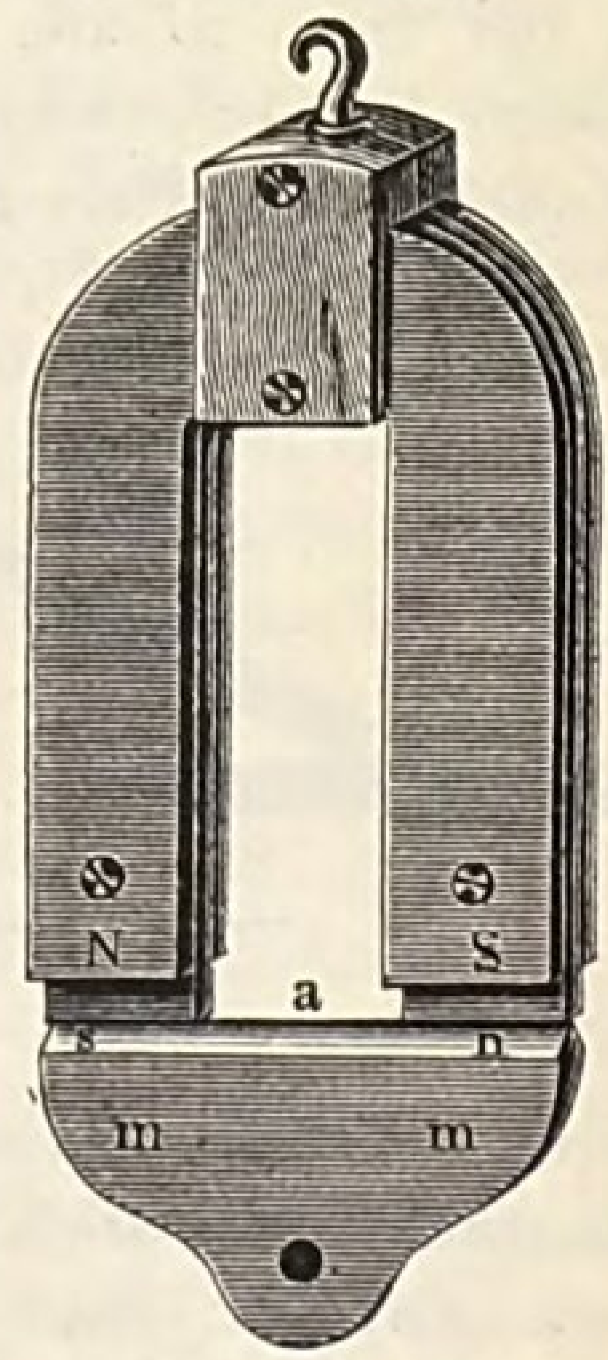


Fig. 17.



werthen lässt, als die der ursprünglichen Magnetpole, weil sie nach einer und derselben Richtung hin frei vorragen.

Um eine starke Tragkraft zu erreichen, muss man dafür sorgen, dass die beiden Pole gleichzeitig zur Wirkung kommen, was bei natürlichen Magneten, welche in der angegebenen Weise mit Armaturen versehen sind, dadurch geschieht, dass man einen eisernen Anker an die Pole p und p' ansetzt, wie man es aus den Figuren ersieht.

Um bei künstlichen Magneten eine möglichst grosse Tragkraft zu erzielen, muss man ihnen eine U-förmige Gestalt geben. Fig. 17 stellt einen solchen Hufeisenmagnet dar. Er besteht aus mehreren hufeisenförmig gebogenen Stahlplatten, welche unmittelbar auf einander

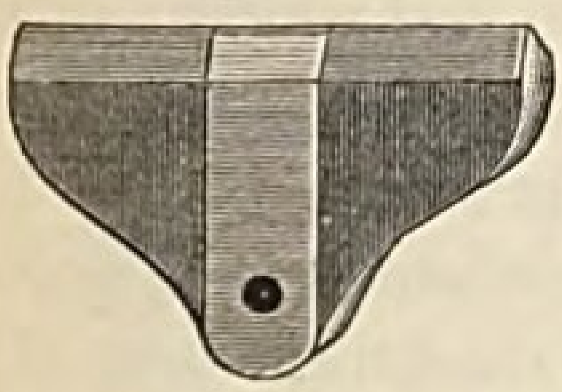
*) Näheres über Magnetisirungsarbeit in der Abhandlung von A. Wassmuth, Wien. Akad. Ber. 2. Abth. XCIV, S. 280.

gelegt werden. Zwei Schrauben halten sie zusammen. Jede Platte wird vor dem Zusammensetzen für sich magnetisirt. Der Bogen des Magnetbündels steckt in einer Hülse von Holz oder Messing, welche mit einem Haken oder mit einem Ringe zum Aufhängen versehen ist.

Ein Stück weiches Eisen *m m* bildet die Armatur, welche hier der Anker heisst und an welchen auch das zu tragende Gewicht angehängt wird. Die Form des Ankers ist nicht gleichgültig. Am besten giebt man ihm die in der Figur angegebene Gestalt. Die Berührungsfläche, mit welcher der Anker die Polflächen berührt, darf nicht zu breit sein, weshalb man denselben oben noch etwas schmäler macht als die Platte ist, aus der er genommen wurde. Man macht die Bahn des Ankers je nach der Grösse der Magnete 1 bis 4 mm breit. Dass bei breiteren Berührungsflächen die Tragkraft geringer wird, rührt wahrscheinlich daher, dass in diesem Falle die Berührung zwischen dem Anker und den Polen nicht leicht so vollständig hergestellt werden kann, als bei schmälerer Bahn.

Denken wir uns den Anker durch einen Messingstreifen von 1 bis 2 cm Breite in zwei gleiche Theile getheilt, wie es Fig. 18 darstellt, so wird jeder Pol des Magnets nur auf die eine Hälfte des Ankers magnetisirend wirken können. Die Tragkraft, welche der Magnet unter diesen Umständen zeigt, ist die Summe der Tragkräfte der beiden einzelnen Pole. Findet aber eine solche Theilung des Ankers nicht statt, besteht er ganz aus weichem Eisen, so pflanzt sich die magnetisirende Wirkung jedes der beiden Magnetpole durch die ganze Masse des Ankers fort. Der Pol *S* begünstigt die Bildung eines Südpols in *s*, *N* unterstützt die Bildung eines Nordpols in *n*, die magnetische Polarität in *n* und in *s* wird also ungleich kräftiger sein, als wenn sie nur von dem benachbarten Pole des Magnets ausgegangen wäre. Daher kommt es denn auch, dass die Tragkraft eines gehörig mit einem Anker armirten Magnets die doppelte Tragkraft des einzelnen Poles bei weitem übertrifft.

Fig. 18.



So vermochte z. B. ein kleiner Hufeisenmagnet bei getheiltem Anker kaum 1 kg zu tragen, während ein ganz eiserner Anker bei einer Belastung von $4^1/_4$ kg noch nicht abriss.

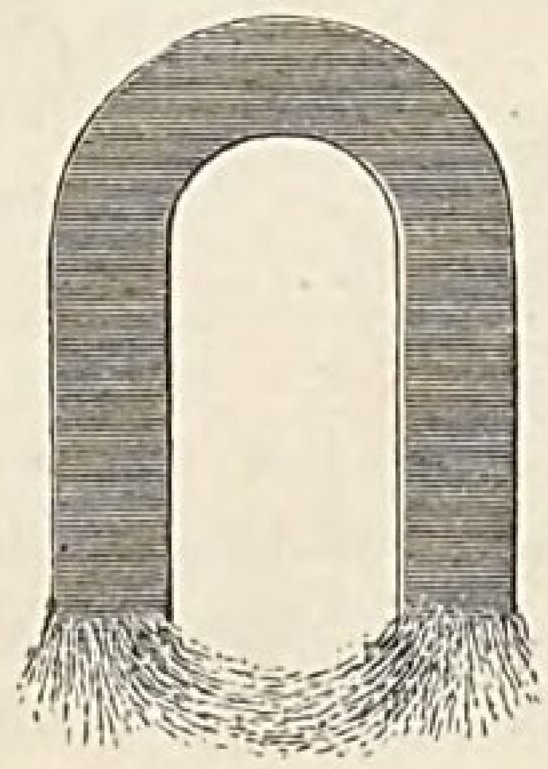
Da jeder Pol eines Hufeisenmagnets durch den angelegten Anker hindurch verstärkend auf den anderen Pol wirkt, so ist der angelegte Anker ein Mittel, eine allmälige Schwächung des Magnets zu verhindern.

Wenn man einen Hufeisenmagnet in Eisenfeile taucht, so hängt sich zwischen den Polen ein Bündel derselben an; wenn man sie nun mit Wasser befeuchtet und dann mittelst einer Weingeistflamme und eines Löthrohrs zum Glühen erhitzt, während sie noch immer dem vertheilenden Einflusse des Magnets ausgesetzt ist, so geht eine theilweise Oxydation des Eisens vor sich, man erhält eine ziemlich compacte Masse,

deren Zusammensetzung der der natürlichen Magnete ähnlich und welche ebenfalls bleibend magnetisch ist.

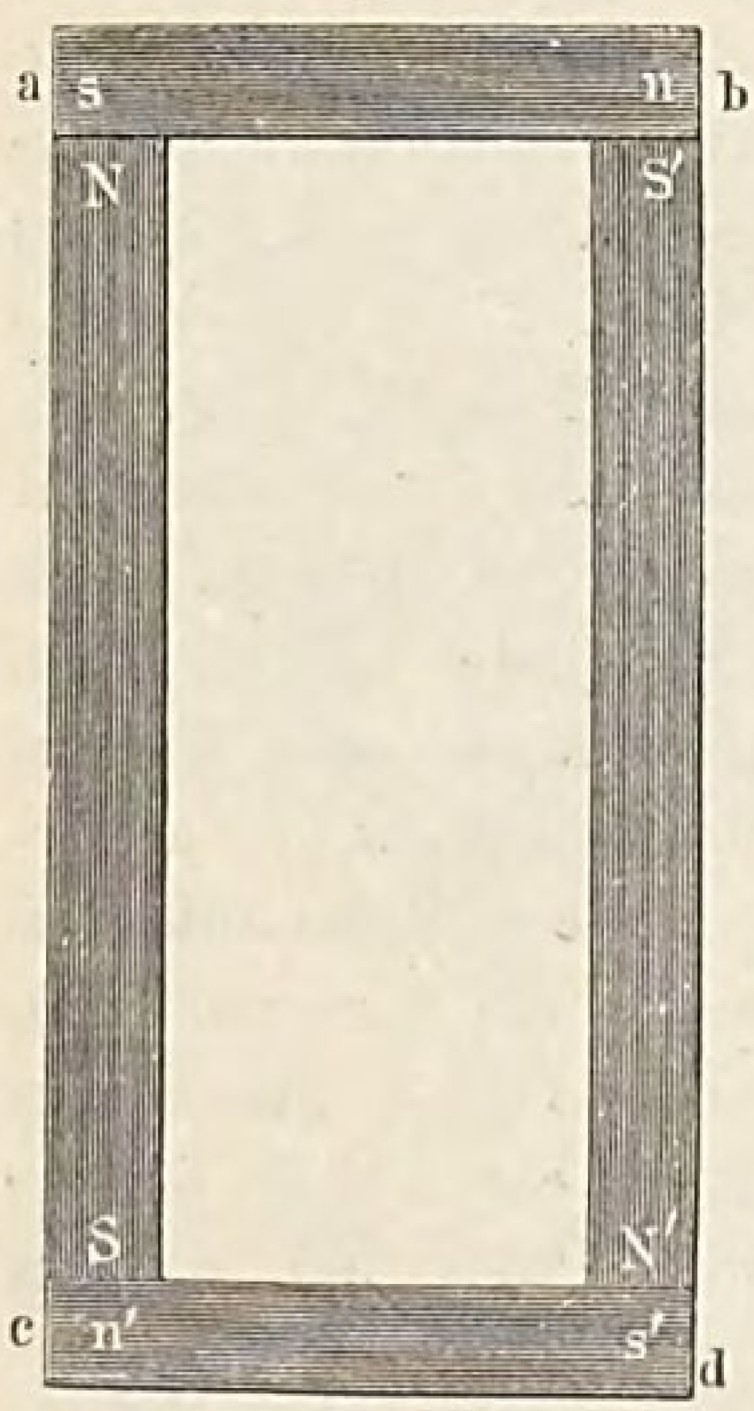
Der eben beschriebene Versuch rührt von Kessler her. Eine schöne Abänderung desselben ergiebt sich, wenn man statt der gewöhnlichen Eisenfeile das feine Eisenpulver der Apotheken in Anwendung bringt.

Fig. 19.



Taucht man die Pole eines Hufeisenmagnets in dieses Eisenpulver, so bleibt an ihnen ein Bündel hängen, wie es Fig. 19 andeutet. Dieses so am Magnet anhängende Bündel Eisenpulver brennt nun, wie Magnus gezeigt hat, für sich ohne Weiteres fort, wenn man es einmal, etwa mit Hülfe eines Streichhölzchens, angezündet hat. Ist nach einiger Zeit die bis dahin langsam fortglimmende Masse erloschen, so ist sie nun auch in einen bleibenden Magnet verwandelt, dessen Theilchen noch besser zusammenhängen, als man es bei der zuerst beschriebenen Form des Versuchs erreichen kann.

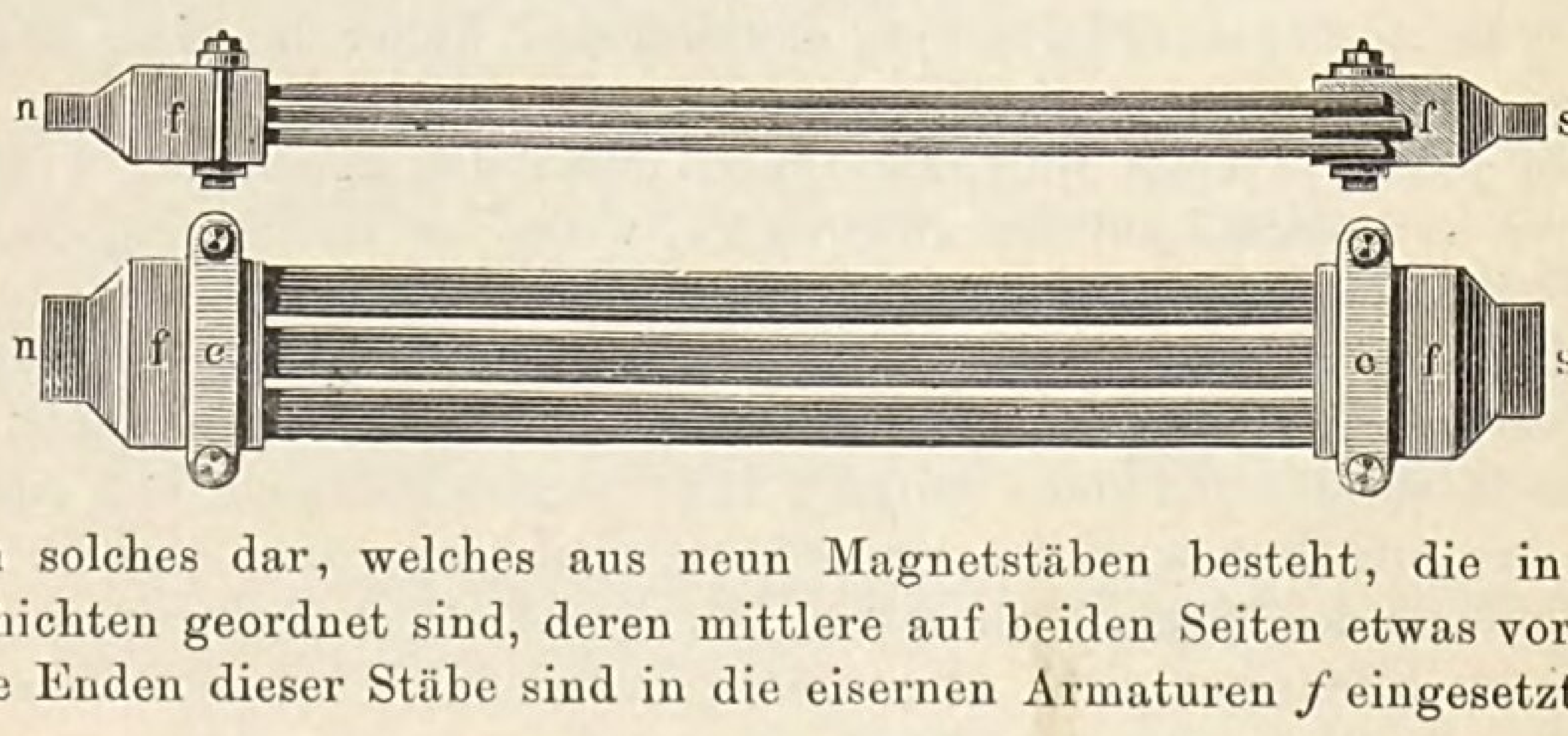
Fig. 20.



Das oben dargelegte Princip der gegenseitigen Influenz durch Vorlegung eines Ankers kann man auch zur Erhaltung des Magnetismus in Stahlstäben in Anwendung bringen. Man legt zwei gleiche Magnetstäbe *NS* und *N' S'*, Fig. 20, parallel so neben einander, dass der Nordpol des einen nach derselben Seite gerichtet ist, wie der Südpol des anderen und fügt dann zwei Stücke von weichem Eisen, *ab* und *cd*, so an, dass dadurch das Rechteck geschlossen wird.

Eiserne Armaturen dienen auch, um nach Coulomb's Methode durch Combination einzelner Magnetstäbe sogenannte magnetische Magazine herzustellen. Fig. 21 stellt

Fig. 21.



ein solches dar, welches aus neun Magnetstäben besteht, die in drei Schichten geordnet sind, deren mittlere auf beiden Seiten etwas vorragt. Die Enden dieser Stäbe sind in die eisernen Armaturen *f* eingesetzt und

durch die Messingbänder c zusammengehalten. Die hervorragenden Enden n und s dieser eisernen Armaturen bilden sehr kräftige Magnetpole, weil in ihnen gewissermaassen die magnetische Polarität der einzelnen Magnetstäbe concentrirt erscheint.

Jamin hat sehr kräftige Hufeisenmagnete aus vielen einzeln magnetisirten und dann zusammengelegten flachen Stahlstreifen hergestellt. Sie sind unter dem Namen der Jamin'schen Blättermagnete bekannt.

Solcher Magnetbündel bedient man sich auch, um nach den in §. 5 besprochenen Methoden die Magnetisirung von Stahlstäben und Stahlnadeln auszuführen.

Tragkraft der Hufeisenmagnete. Wenn man einen aus einer 8
einzigen Stahllamelle bestehenden Hufeisenmagnet auf einen ganz gleichen in der Weise auflegt, dass die gleichnamigen Pole auf einander zu liegen kommen, so kommt in Folge der gegenseitigen Influenz eine gegenseitige Schwächung der beiden Magnete zu Stande. Legt man z. B. in der angegebenen Weise zwei Hufeisenmagnete auf einander, deren jeder für sich allein 5 kg zu tragen im Stande ist, so werden sie, zu einem Magnet verbunden, nicht im Stande sein, eine Last von 10 kg zu tragen.

Daraus geht denn überhaupt hervor, dass die Tragkraft der Hufeisenmagnete durchaus nicht ihrer Masse proportional wachsen kann, denn eine Stahlplatte von doppelter Dicke kann als eine Combination von zwei Stahlplatten einfacher Dicke betrachtet werden.

Wenn man eine hufeisenförmige Stahllamelle magnetisirt, während der Anker vorgelegt ist, so kann man ihren Magnetismus weit über die Grenze hinaus steigern, die sich ohne Anker erreichen lässt. Sobald aber der Anker abgerissen wird, nimmt der Magnetismus wieder ab und der Magnet trägt jetzt bei weitem nicht mehr so viel als vorher. Unter constanter Tragkraft eines Magnets versteht man diejenige, welche ihm nach mehrmaligem Abreissen des Ankers noch bleibt. Durch Stossen, Fallenlassen etc. kann freilich auch die constante Tragkraft eines Magnets noch bedeutend geschwächt werden.

Nach Häcker's Versuchen besteht zwischen Gewicht und Tragkraft stählerner Hufeisenmagnete die Relation:

$$M = a \sqrt[3]{P^2},$$

wenn M die Tragkraft, P das Gewicht des Magnets, a aber einen constanten Factor bezeichnet. Für seine ausgezeichneten Stahlmagnete ergab sich hier, wenn P und M in Pfunden ausgedrückt sind, der Werth 12,6, auf Kilogramme umgerechnet erhält man $a = 10$ (genauer 10,3). Nach dieser Formel ergeben sich beispielsweise folgende Tragkräfte, wie sie in der zweiten Columne der Tabelle auf folgender Seite berechnet sind.

Ganz besonders kräftige Magnete werden von N. van Wetteren in Harlem hergestellt. Die Tragkraft der Hufeisenmagnete dieser Firma ist etwas mehr als doppelt so gross, als sie sich nach Häcker's Formel

mittelst der Constanten $a = 10$ berechnet, wie man sich durch die Zahlen der dritten Spalte der folgenden Tabelle überzeugen kann. Es würde sich aus denselben für a der Durchschnittswerth 21 berechnen.

Gewicht in Kilogrammen	Tragkraft in Kilogrammen	
	berechnet nach Häcker's Formel	der Magnete von N. van Wetteren
0,5	6,3	11,5
1	10,0	21
1,5	13,1	27
2	15,8	33
5	29,2	61
10	46,4	97
20	73,7	154
30	96,6	202
40	117,0	245
50	136,0	285
100	215,5	452

9 **Vorstellungen über das Wesen des magnetischen Zustandes.** Zur Erklärung der magnetischen Erscheinungen hat man früher die Hypothese aufgestellt, dass im Stahl und im Eisen zwei imponderabele Flüssigkeiten vorhanden seien, denen die Eigenschaft zukommen soll, dass die Theilchen derselben Flüssigkeit einander abstossen, dass aber eine Anziehung stattfinde zwischen den Theilchen der einen und den Theilchen der anderen Flüssigkeit.

Der bei den magnetischen Polen üblichen Bezeichnungsweise entsprechend hat man die beiden Flüssigkeiten als nordmagnetisches und südmagnetisches Fluidum unterschieden.

Was die Vertheilung der beiden magnetischen Fluida in einem Magnete betrifft, so schien es auf den ersten Blick am einfachsten, anzunehmen, dass in der Mittellinie kein magnetisches Fluidum, dass aber von da nach dem einen Pole hin das nordmagnetische, nach dem anderen hin das südmagnetische Fluidum in immer wachsender Dichtigkeit vorhanden sei. Wäre diese Vorstellungsweise richtig, so müsste ein Magnetstab, den man in seiner Mittellinie durchbricht, zwei Stücke liefern, von denen das eine nur ein Nordpol, das andere nur einen Südpol hat. Der Versuch lehrt, dass dieses nicht der Fall ist, da die Bruchstücke stets sowohl nördlichen als südlichen Magnetismus besitzen. Da ferner die Versuche beim Streichen von Stahlstäben mit Magneten zeigen, dass der

neue Magnet nicht auf Kosten des alten entsteht, indem der letztere nichts von seinem Magnetismus verliert, während der neue Magnet sich bildet, so konnte man auch nicht annehmen, dass das Magnetisiren auf einem Ueberführen magnetischer Fluida beruhe. Man nahm daher an, dass beide Fluida zuvor in jedem Stahl- oder Eisenmolecüle ein für allemal in gleichen Mengen, sich neutralisirend, vorhanden seien. Beim Magnetisiren werden diese Fluida in jedem Molecüle gesondert und an den entgegengesetzten Enden derselben angehäuft. Diese Hypothese gestattet allerdings, wie Poisson gezeigt hat, die wichtigsten magnetischen Erscheinungen zu erklären, da aber die Annahme solcher unwägbarer Fluida an sich höchst unwahrscheinlich ist, so wurde diese Vorstellung wiederum verlassen und eine von W. Weber gegebene Vorstellungsweise angenommen, welche sich ohne Annahme solcher Fluida

Fig. 22.

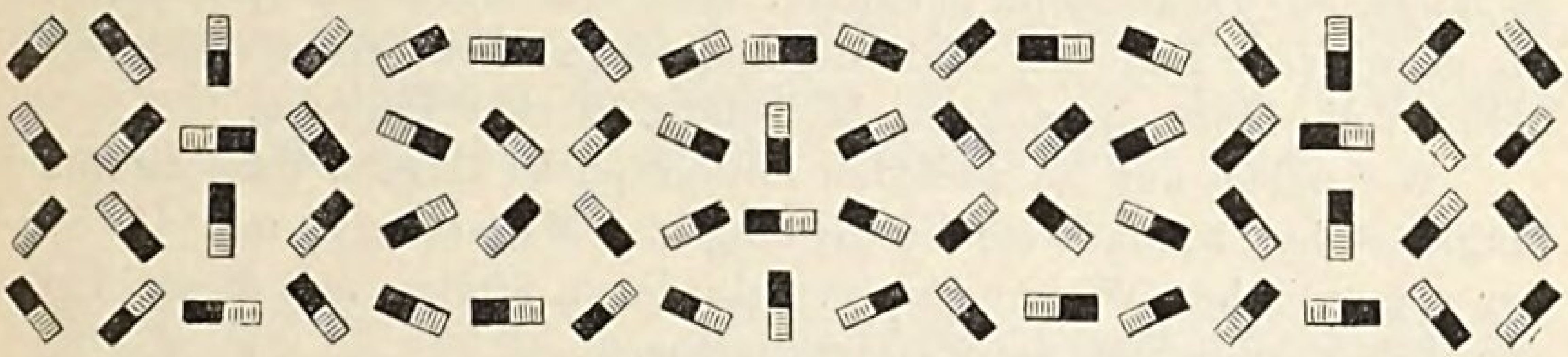
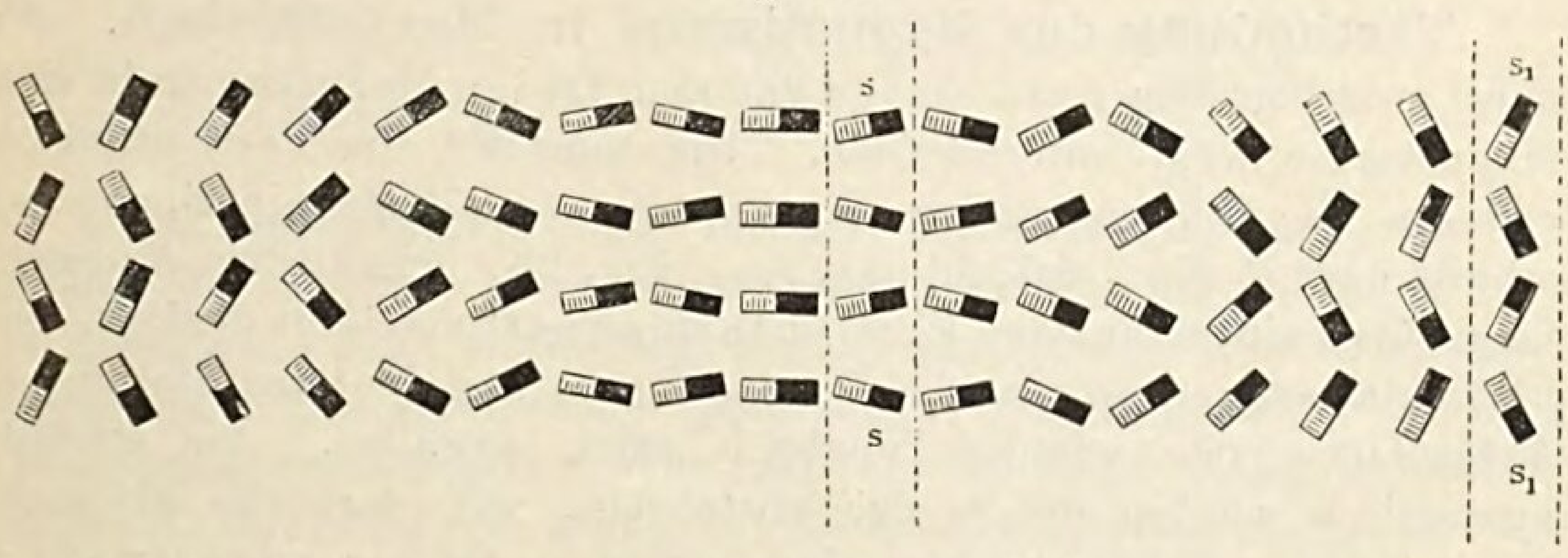


Fig. 23.



den Beobachtungen anschmiegen lässt. Nach dieser zweiten Vorstellungsweise besteht jedes Stück Eisen oder Stahl aus Molecülen oder Elementartheilchen, deren jedes von vorn herein ein Magnet mit zwei Polen ist. Man nennt dieselben Molecular- oder Elementarmagnete. In jedem unmagnetischen Eisen- oder Stahlstücke haben diese Elementarmagnete eine verworrene unregelmässige Lage, so dass keinerlei Richtung der magnetischen Axen überwiegt. In magnetischem Eisen oder Stahl dagegen haben die Molecularmagnete eine mehr oder weniger vorherrschende, übereinstimmende Richtung. Fig. 22 mag ein beiläufiges Bild eines unmagnetischen Stabes geben. Für jede Lage eines Elementarmagnetes kommt im selben Querschnitte eine entgegengesetzte vor, es kann also in keiner Schichte magnetische Wirkung nach aussen eintreten. Fig. 23 dagegen zeigt die Anordnung der Molecularmagnete

in einem magnetischen Stabe. Die dunkeln Theile, welche die nordmagnetischen Hälften der Molecularmagnete vorstellen mögen, sind gegen das rechte Ende, die südmagnetischen Hälften gegen das linke Ende des Stabes gerichtet. Dabei ist nicht erforderlich, dass alle Molecularmagnete mit dieser Richtung übereinstimmen, auch nicht, dass dieselben genau die Richtung der magnetischen Axe des Stabes annehmen. Es wird sich dies vielmehr nach der Stärke des Magnetismus richten. Je zahlreicher und je genauer an einer Stelle des Stabes die Molecularmagnete mit ihren Richtungen übereinstimmen, desto stärker wird daselbst der magnetische Zustand (nicht der freie Magnetismus) sein. Die Magnetisirung eines unmagnetischen Stabes beruht dann auf einer Drehung der Molecularmagnete in eine solche Lage, dass eine überwiegende Orientirung derselben in der Richtung der magnetischen Axe des Stabes entsteht. Bei Eisenstäben erhält sich diese neue Lage nur so lange, als die Influenz andauert, nach dem Aufhören derselben kehrt die verworrene Lage der Molecularmagnete zurück. Beim Stahl dagegen nehmen die Molecularmagnete bleibend ihre neue Lage an.

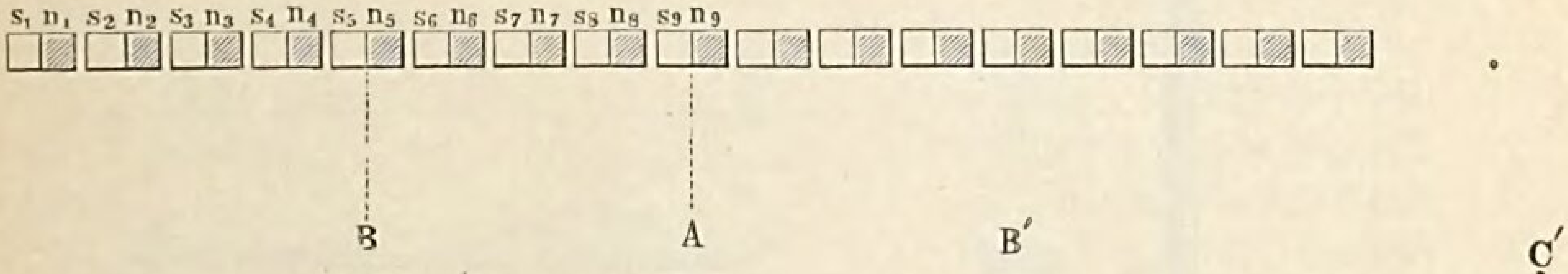
Wir haben nun im nächsten Paragraph zu zeigen, dass die an den Magnetstäben beobachtete Vertheilung des Magnetismus und die Stärke der magnetischen Wirkung an verschiedenen Stellen mit dieser Theorie der Molecularmagnete im Einklang stehe.

10 **Vertheilung des Magnetismus in Magnetstäben.** Man muss zwischen dem gesammten und dem freien Magnetismus in einem Magnetstabe wohl unterscheiden. Um zunächst die Vertheilung des ersteren zu studiren, wollen wir uns die sämmtlichen in einem Querschnitt oder in einer Schichte ss, $s_1 s_1$, Fig. 23, befindlichen Molecularmagnete zu einem einzigen Elementarmagnete vereinigt denken. Diese Elementarmagnete würden bei der in Fig. 23 angedeuteten Stellung der Molecularmagnete offenbar ungleich stark ausfallen. Am stärksten magnetisch würden die in der Mitte sein, weil dort alle Molecularmagnete ganz gleich gerichtet sind, etwas schwächer schon würde der die Schichte ss vertretende Elementarmagnet ausfallen, am schwächsten der die äusserste Schichte $s_1 s_1$ vertretende. Es fragt sich nun, ob nicht eine gleiche Entwickelung von Magnetismus in den einzelnen Elementarmagneten als wahrscheinlicher anzunehmen ist. Wir werden gleich sehen, dass diese Annahme unzulässig ist, dass vielmehr die einzelnen, isolirt gedachten Elementarmagnete gegen die Enden schwächer magnetisch angenommen werden müssen.

Es stelle Fig. 24 die Reihe der Elementarmagnete vor. Angenommen, dieselben wären für sich ursprünglich gleich stark magnetisch, so könnten sie es in Folge der Influenzwirkung nicht bleiben. Der Elementarmagnet $s_1 n_1$ ist der Influenz der Südpole s_2, s_3, s_4, s_5 etc. ausgesetzt, welche seinen Magnetismus verstärken, ferner der Influenz der Nordpole n_2, n_3, n_4, n_5 etc., welche ihn schwächen. Da aber die Südpole sämmt-

lich näher liegen als die gleich numerirten Nordpole, so überwiegt die verstärkende Wirkung der Influenz. Derselben Wirkung und überdies noch der Influenzwirkung des Elementarmagnets $s_1 n_1$ ist der zweite Elementarmagnet $s_2 n_2$ ausgesetzt. Er muss daher stärker magnetisch werden als $s_1 n_1$. Ebenso muss $s_3 n_3$ stärker werden als $s_2 n_2$ und so findet man leicht, dass gegen die Mitte hin von beiden Seiten her die Elementarmagnete stärker magnetisch werden müssen. Ob diese stärkere Magnetisirung auf einer stärkeren Drehung und vollkommeneren Gleichrichtung der Molecularmagnete, wie in Fig. 23 angenommen ist, oder auf der gleich grossen Drehung zahlreicherer Molecularmagnete beruht, bleibt noch unentschieden. Für die Richtigkeit der Ansicht, dass der Magnetismus in den Theilchen in der Mitte des Stabes stärker entwickelt ist, als an den Enden, spricht die Thatsache, dass, wenn man eine Reihe von Stahlstäbchen hinter einander legt, so dass sie gewissermaassen einen grösseren Stab zusammensetzen, und sie dann so behandelt, als wenn man den ganzen Stab magnetisiren wollte, dass alsdann nach dem Auseinandernehmen die Stäbchen um so stärkeren Magnetismus zeigen, je näher sie während des Streichens der Mitte lagen.

Fig. 24.



Ganz anders verhält es sich mit dem freien Magnetismus, also auch mit der Wirkung des Magnetstabes nach aussen an verschiedenen Theilen desselben. Der freie Magnetismus ist nämlich durch die Differenz der Magnetismen der an einander grenzenden entgegengesetzten Pole der Elementarmagnete gegeben, oder, falls wir nördlichen Magnetismus mit positivem, südlichen mit negativem Zeichen bezeichnen, durch die algebraische Summe der Magnetismen der an einander stossenden Pole. Da nun der Magnetismus von s_2 stärker ist, als der entgegengesetzte von n_1, ebenso der von s_3 stärker als der von n_2 etc., so muss auf dieser Hälfte des Stabes überall freier südlicher Magnetismus vorhanden sein. Ebenso findet man dann, dass die andere Hälfte freien nördlichen Magnetismus besitzen muss. Die Zunahme des freien Magnetismus erklärt sich dann durch die Annahme, dass die Differenzen der Magnetismen benachbarter Elementarmagnete gegen die Enden zunehmen.

Die Fernwirkung müsste übrigens auch dann gegen die Pole hin zunehmen, wenn die Elementarmagnete alle gleich stark wären. Ein Eisentheilchen in A, Fig. 24, erleidet nämlich keine Anziehung, da die gleich starken, entgegengesetzten Influenzen sich gerade aufheben. Ein Eisentheilchen in B würde von den Elementarmagneten $s_1 n_1$ bis incl.

$s_9 n_9$ nicht angezogen, weil sich ebenfalls die entgegengesetzten Magnetismen aufheben. Es bliebe demnach die Wirkung der übrigen Elementarmagnete übrig, welche sämmtlich den Südpol zukehren. Es muss also die Anziehung der Südpole überwiegen. Dasselbe würde in Bezug auf ein Eisentheilchen in C stattfinden.

Die Erfahrung bestätigt unsere Schlüsse. Schon beim Eintauchen in Eisenfeilspäne haben wir gesehen, dass die Anziehung an den Enden eines Stabes am grössten und dass sie in seiner Mitte gleich Null ist.

Das Gesetz, nach welchem die Stärke der magnetischen Wirkung von den Enden eines magnetischen Stabes nach seiner Mitte hin abnimmt, hat Coulomb durch eine Reihe sorgfältiger Versuche ermittelt. Er hing eine kleine 12 mm lange und 6 mm dicke Probirnadel von wohl gehärtetem Stahl an einem einfachen Seidenfaden auf und liess sie zuerst nur unter dem Einfluss des Erdmagnetismus oscilliren; er näherte alsdann den zu untersuchenden vertical gehaltenen Stab der Nadel in der

Fig. 25.

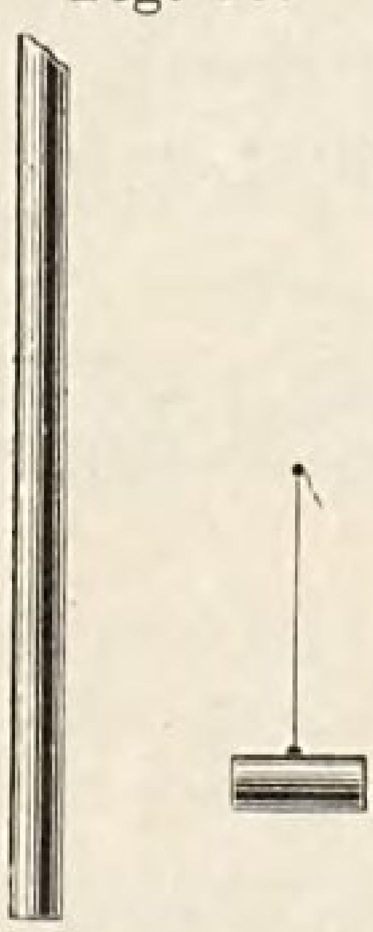
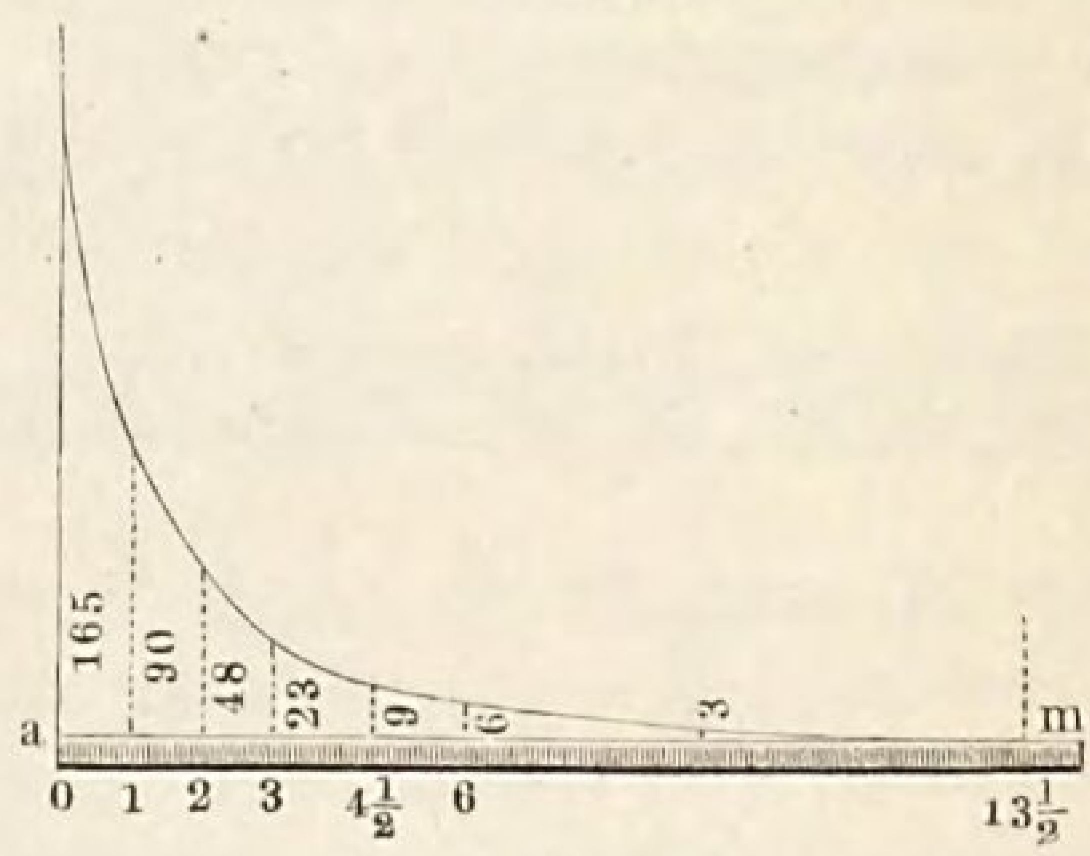


Fig. 26.



durch Fig. 25 dargestellten Weise so, dass er sich im magnetischen Meridian der Nadel befand. Während der Abstand des Stabes von dem nächsten Pole der Nadel 17 mm betrug, wobei er den Südpol des Stabes dem Nordpole der Nadel näherte, wurden die Oscillationen beschleunigt; allein die Beschleunigung der Nadel war ungleich, je nachdem verschiedene Stellen des Stabes der Nadel gegenüber standen, die Schwingungen wurden nämlich um so langsamer, je mehr die der Nadel gegenüber gehaltenen Stellen sich der Mitte des Magnetstabes näherten. Wenn die Nadel der Mitte des Stabes gegenüber stand, oscillirte sie gerade so schnell, als ob der Stab gar nicht da wäre. Aus der für jede Stelle des Stabes beobachteten Schwingungsdauer konnte man auf die Stärke ihrer magnetischen Anziehung auf dieselbe Weise schliessen, wie wir schon oben kennen gelernt haben.

Die Resultate seiner, mit einem cylindrischen Stabe von 4 mm Durchmesser angestellten Beobachtungen lassen sich, wie Fig. 26 geschehen ist, graphisch darstellen. Es stellt am die eine Hälfte des Magnetstabes dar, m ist seine Mitte, a das eine Ende, von welchem aus die Abscissen nach Centimetern gemessen sind. Die an verschiedenen Stellen errich-

teten Ordinaten sind der an dieser Stelle beobachteten magnetischen Intensität proportional nach einer beliebigen Einheit aufgetragen. Man sieht, dass am Ende a die Intensität am grössten ist, dass sie von a gegen die Mitte hin anfangs sehr rasch abnimmt und in der Mitte Null wird. Die Curve hat für alle Stäbe, deren Länge mehr als 25 cm beträgt, sehr nahe dieselbe Gestalt, so dass in der Mitte ein mehr oder weniger grosser Raum sich befindet, für welchen die Intensität so gut wie Null ist. Biot hat für diese Intensitätscurve die empirische Gleichung

$$y = A\,(m^x - m^{2l-x})$$

aufgestellt, in welcher $2l$ die Länge des Stabes bezeichnet, während A und m Constante sind. Die Abscissen x werden von dem einen Ende des Stabes in der Richtung gegen das andere Ende hin gezählt.

Lage der magnetischen Pole. Wir haben im §. 2 eine Definition der Pole eines Magneten angedeutet; wir sind jetzt in der Lage, dieselbe schärfer zu fassen und die Lage der Pole genauer auszumitteln. 11

Fig. 27.

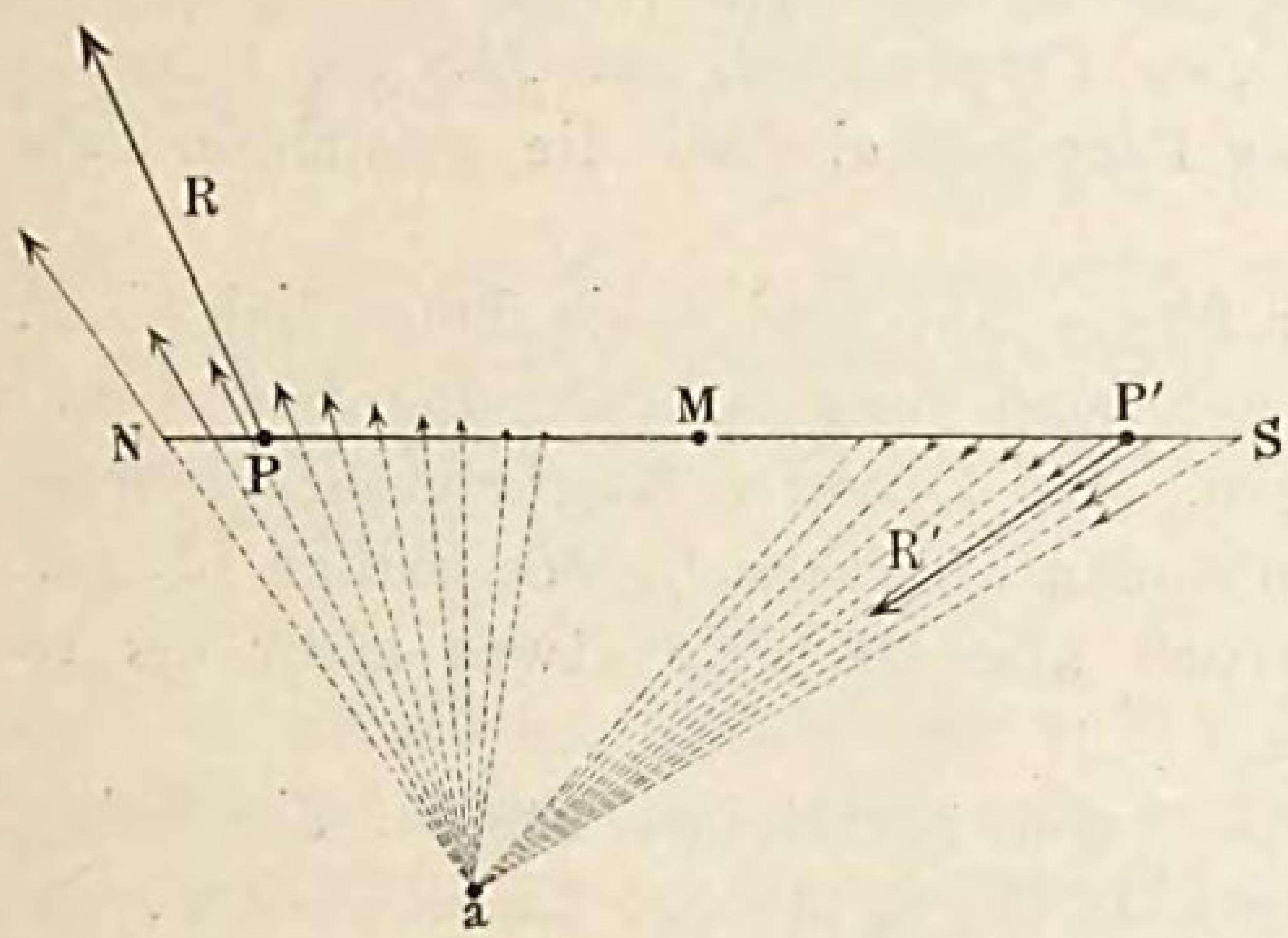
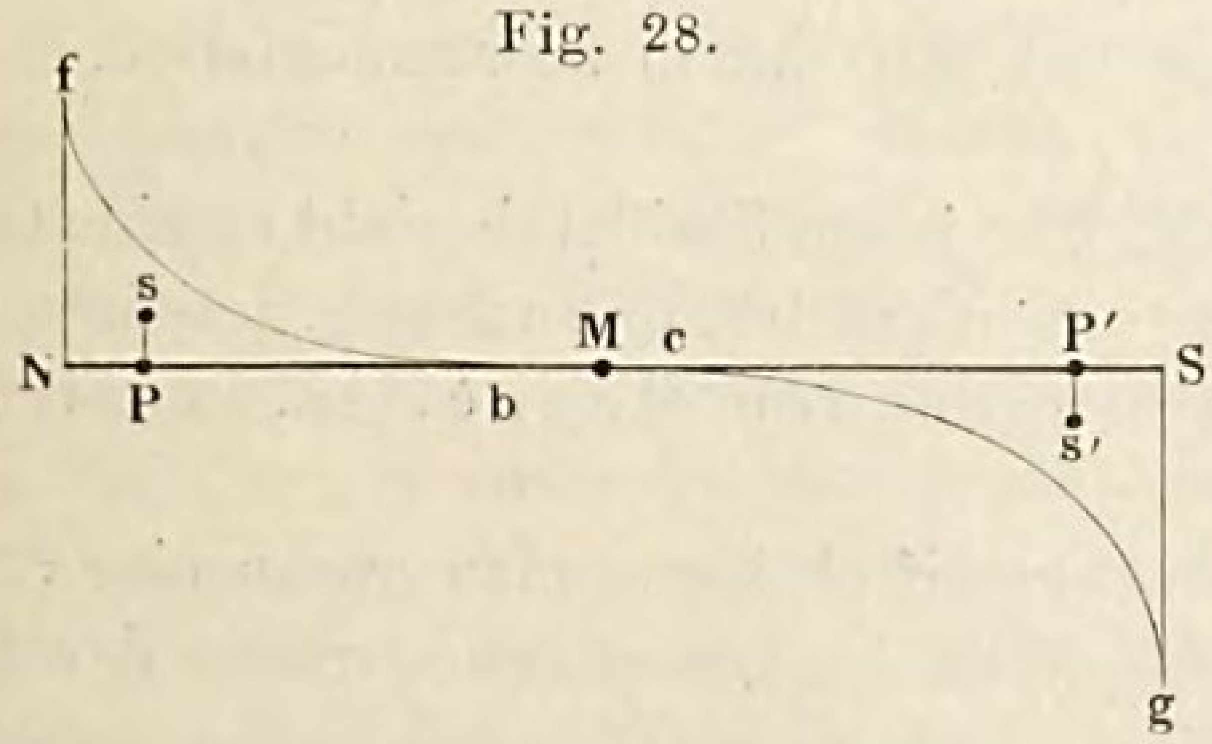


Fig. 28.



Es sei NS, Fig. 27, ein geradliniger, regelmässig magnetisirter Stahlstab und a irgend ein ausserhalb des Stabes liegendes, etwa nordmagnetisches Partikelchen, so wirkt dasselbe abstossend auf alle Molecüle der einen Hälfte MN des Magnetstabes, anziehend aber auf alle Molecüle der anderen Hälfte MS desselben, und zwar ist die anziehende oder abstossende Kraft, mit welcher a auf irgend ein Molecül des Stahlstabes wirkt, dem freien Magnetismus dieser Stelle proportional, wie dies in unserer Figur durch die Pfeilchen angedeutet sein soll.

Alle abstossenden Kräfte, mit welchen a auf die einzelnen Molecüle der nordmagnetischen Stabhälfte wirkt, kann man sich zu einer Resultirenden R vereinigt denken, während wir mit R' die Resultirende aller elementaren Anziehungskräfte bezeichnen wollen, mit welchen a auf die Molecüle der südmagnetischen Stabhälfte wirkt.

Die Lage der Angriffspunkte P und P' dieser beiden Resultirenden ändert sich im Allgemeinen, wenn auch nicht bedeutend, mit der Lage des Punktes a; für alle Punkte aber, welche so weit von dem Magnetstab wegliegen, dass man die von ihnen aus nach den Endpunkten N und S gezogenen Geraden ohne merklichen Fehler als parallel betrachten kann, ist die Lage dieser Angriffspunkte unabänderlich dieselbe.

Mit dem Namen der Pole des Magnetstabes bezeichnet man nun die Angriffspunkte der Resultirenden einerseits aller anziehenden und andererseits aller abstossenden Kräfte, mit welchen ein sehr weit vom Magnetstab entfernt liegendes magnetisches Partikelchen auf die einzelnen Molecüle des Magnetstabes wirkt.

Die Lage der so definirten magnetischen Pole ergiebt sich mit Hülfe der im vorigen Paragraphen besprochenen Intensitätscurve. Um die Lage der Pole zu finden, hat man nämlich nur die Schwerpunkte s und s' der Flächenstücke bfN und cSg zu bestimmen, welche einerseits durch den Magnetstab, andererseits durch die Intensitätscurve begrenzt sind, und von diesen Schwerpunkten Perpendikel auf NS zu fällen. Die Fusspunkte P und P' dieser Perpendikel sind die gesuchten Pole des Magnetstabes.

Für Stäbe, welche über 25 cm lang und 4 bis 5 mm dick sind, hat Coulomb durch Rechnung gefunden, dass die Pole ungefähr 4 cm weit von den Enden entfernt liegen. Bei kürzeren Magnetstäben beträgt die Entfernung der Pole von den Enden ungefähr $^1/_3$ der halben Länge. Bei einem 9 cm langen Stabe werden also die Pole etwas mehr als 18 mm von den Enden entfernt sein.

Bei Stäben, deren Dicke 5 mm übersteigt, rücken die Pole mehr gegen die Mitte hin, für dünnere liegen sie den Enden näher, so dass sie in ganz dünnen magnetischen Stahldrähten von 1 bis 1,5 mm Durchmesser ohne merklichen Fehler mit den Enden zusammenfallen.

12 **Der Sättigungspunkt.** Für jeden Stahlstab giebt es eine Grenze, über welche hinaus man denselben nicht bleibend magnetisiren kann, und dieses Maximum des bleibenden Magnetismus wird der Sättigungspunkt genannt.

Durch kräftige Magnetisirungsmittel kann man zwar einen Stahlstab weit über den Sättigungspunkt hinaus magnetisiren, der Ueberschuss des Magnetismus verliert sich aber allmälig wieder, wenn die magnetisirende Kraft zu wirken aufhört und der Stab sich selbst überlassen bleibt.

Der Sättigungspunkt eines Stahlstabes ist durch seine Coërcitivkraft, also durch seinen Härtungsgrad, bedingt.

Je weicher der Stahlstab, desto niedriger liegt im Allgemeinen sein Sättigungspunkt, d. h. desto schwächer ist der Magnetismus, welchen er zurückzuhalten vermag.

Häcker in Nürnberg, welchem es gelungen ist, äusserst kräftige Magnetstäbe herzustellen, hat zahlreiche Versuche über die Schwingungsdauer von Stäben angestellt, welche bis zu ihrem Sättigungspunkte magnetisirt sind, und gefunden, dass sie sich nach der empirischen Formel

$$T = c \sqrt[3]{P} \sqrt[6]{L}$$

berechnen lässt, in welcher T die Schwingungsdauer in Secunden, P das Gewicht in Lothen, und L die Länge der Magnetstäbe in Zollen, c aber einen constanten Factor bezeichnet, welcher von der Stärke des Magnetismus abhängt. Für die von ihm gemachten Magnetstäbe fand er $c = 2{,}67$. Liegt der Sättigungspunkt tiefer, so wird der Factor c grösser. Bei später gemachten Magnetstäben brachte Häcker den Factor c bis auf 2,35 herunter.

Setzt man 1 Loth = 17,5 g und 1 Zoll = 2,43 cm, so erhält man durch Umrechnung auf metrisches Maass und Gewicht statt des Häcker'schen Coëfficienten $c = 2{,}67$ den Coëfficienten 0,8869, wo nun p in Grammen, l in Centimetern zu messen ist. Für den später bestimmten Werth der Constanten $c = 2{,}35$ erhält man bei der Umrechnung 0,780. Indem wir diesen Werth auf 0,8 abrunden, erhalten wir also für die Schwingungsdauer die Formel

$$T = 0{,}8 \sqrt[3]{p} \sqrt[6]{l},$$

wo nun p in Grammen, l in Centimetern zu messen ist. Diese Formel giebt uns einen beiläufigen Anhaltspunkt, um die Stärke eines Magnetstabes zu beurtheilen*). Für einen Stab von 11,4 cm Länge und 64 g Gewicht berechnet sich

$$T = 0{,}8 \sqrt[3]{64} \sqrt[6]{11{,}4} = 0{,}8 \,.\, 4 \,.\, 1{,}5 = 4{,}8 \text{ Secunden.}$$

Würde also ein solcher Magnetstab z. B. 8 Secunden brauchen, so würden wir daraus entnehmen, dass sein Magnetismus noch ziemlich weit von dem von Häcker erreichten Sättigungspunkt entfernt ist.

Man sieht aus obiger Formel, dass die Schwingungsdauer von Magnetstäben, welche bis zum Sättigungspunkt magnetisirt sind, bei gleichen Längen noch von der Masse, also vom Durchmesser abhängt. Je dicker sie sind, deso langsamer schwingen sie. — Wäre in einem dicken Stabe in jedem Punkte der Magnetismus eben so stark entwickelt, als in einem dünnen, so müsste die Schwingungsdauer von den Dimensionen des Querschnittes des Stabes nahe unabhängig sein. Da nun aber die dicken Stäbe langsamer schwingen, so folgt, dass in einem dünnen Stahlstabe eine verhältnissmässig weit stärkere Entwickelung des freien Magnetismus möglich ist als in einem dickeren.

Der Grund davon wurde bereits im §. 8 aus einander gesetzt. Jeder Stab hat, wenn beide mit gleichnamigen Polen auf einander gelegt werden, ein Bestreben, die Polarität des anderen umzukehren. Eine solche Umkehrung findet nun freilich nicht statt, jeder der beiden Stäbe schwächt aber wenigstens den Magnetismus des anderen.

*) Die genaueren Methoden, bei welchen auf die wechselnde Stärke des Erdmagnetismus Rücksicht genommen wird, folgen unten in §. 44.

Wie sich aber hier die beiden Magnetstäbchen gegen einander verhalten, so verhalten sich in einem Magnetstabe zwei neben einander liegende Längsstreifen, es ist also klar, dass man einen Stahlstab von grösserem Querschnitte nicht bis zu derselben Grenze magnetisiren kann, wie einen dünneren.

13 **Einfluss der Wärme auf den Magnetismus.** Wir haben schon gehört, dass ein natürlicher Magnet sowohl wie ein künstlicher seinen Magnetismus vollständig verliert, wenn man ihn bis zum Weissglühen erhitzt, d. h. nach dem Erkalten zeigt er keine magnetische Polarität mehr. Diese Beobachtung ist schon von Gilbert gemacht worden. Dadurch verlieren aber die Körper die Eigenschaft nicht, wieder magnetisch zu werden, wenn man sie durch die bekannten Verfahrungsarten wieder magnetisirt. Ihre Coërcitivkraft ist jedoch geändert; die der natürlichen Magnete nimmt ab, ohne dass man im Stande ist, sie in ihrer ursprünglichen Stärke wieder herzustellen, die der künstlichen Magnete ist sehr geschwächt, lässt sich aber durch neues Härten vollkommen wieder herstellen.

Der Verlust des Magnetismus findet nicht auf einmal, sondern nach und nach statt in dem Maasse, als die Temperatur steigt. Um sich davon zu überzeugen, nehme man einen Magnetstab, dessen Stärke man durch die Oscillationsdauer bestimmt; man erhitze ihn nach einander bis zu verschiedenen Wärmegraden und lasse ihn jedesmal wieder erkalten. Hat man ihn z. B. bis 100⁰ erwärmt, so wird er nach dem Erkalten langsamer oscilliren als vorher. Erwärmt man ihn dann bis auf 200⁰, so wird man finden, dass sein Magnetismus wieder abgenommen hat etc.

Die magnetische Kraft eines bei niedriger Temperatur magnetisirten Magnets nimmt bei Erhöhung der Temperatur fortwährend ab. So war z. B. die Magnetkraft eines bei 20⁰ magnetisirten Stabes bei einer Temperatur von 95⁰ nur noch 0,633 von derjenigen, welche er bei 20⁰ zeigte. Bei der Abkühlung des Stabes kam aber ein Theil des verlorenen Magnetismus wieder zum Vorschein, so dass nach dem Erkalten auf 20⁰ seine Magnetkraft wieder auf 0,702 der ursprünglichen gestiegen war.

Kupffer hat bemerkt, dass man einen Magnet längere Zeit einer bestimmten Temperatur aussetzen muss, wenn er allen Magnetismus verlieren soll, den er bei dieser Temperatur überhaupt verlieren kann. Eine Magnetnadel z. B., welche mehrmals nach einander 10 Minuten lang in kochendes Wasser gesteckt wurde, verlor erst nach sechs Eintauchungen ihren Magnetismus, soweit es für diese Temperatur möglich war. Um 200 Schwingungen zu machen, brauchte sie vor dem ersten Eintauchen 578 Secunden, nach dem ersten Eintauchen 637″, nach dem zweiten 642″, nach dem dritten 645″, nach dem vierten 647″, nach dem fünften 650″, nach dem sechsten 652″ und nach dem siebenten Eintauchen endlich wieder 652 Secunden. Dieser Umstand ist für die Herstellung von Magneten constanter Stärke wichtig; wir kommen darauf an geeigneter Stelle zurück.

Dufour hat die interessante Beobachtung gemacht, dass ein bei höherer Temperatur (nicht bis zum Sättigungspunkt) magnetisirter Stahlstab sowohl bei gesteigerter Erwärmung als auch bei Erkaltung an Magnetkraft abnehme. An einem bei 60⁰ magnetisirten Stahlstabe beobachtete er folgende zusammengehörige Temperaturen und magnetische Intensitäten:

Temperatur	60⁰	42⁰	23⁰	3⁰
Intensität	1,71	1,63	1,53	1,35

Die Magnetkraft eines bei 2⁰ magnetisirten Stahlstabes nahm, als derselbe durch eine Kältemischung bis — 25⁰ erkaltet wurde, im Verhältniss von 5,1 zu 4,9 ab.

Ein Magnet, bis zu heller Rothglühhitze erwärmt, verliert seinen Magnetismus so vollständig, dass er sich gegen Eisen, gegen einen anderen Magneten ganz indifferent verhält. Ebenso wird auch weissglühendes Eisen von einem Magnet nicht mehr angezogen. Bei dem Eisen giebt es also eine Temperaturgrenze, über welche hinaus es für den Einfluss des Magnetismus unempfänglich ist.

Die Betrachtung dieser magnetischen Grenze führt uns auf den Gedanken, dass es auch für jene wenigen Körper, an denen man ebenfalls schwach magnetische Eigenschaften wahrgenommen hat, eine solche magnetische Grenze geben könne, und in der That hat der Versuch diese Erwartung bestätigt. Es hat sich ergeben:

1. dass für Kobalt diese Grenztemperatur noch weit über der Weissglühhitze liegen müsse, denn in den höchsten Temperaturen, welchen man das Kobalt aussetzte, fand man es noch magnetisch;
2. dass die magnetische Grenze des Chroms etwas unter der Temperatur des Dunkelrothglühens liege;
3. dass die magnetische Grenze des Nickels ungefähr bei 350⁰, d. h. in der Nähe des Schmelzpunktes des Zinks liegt;
4. dass die magnetische Grenze des Braunsteins 20⁰ bis 25⁰ über Null liegt.

Magnetische Declination. Wir haben bereits oben gesehen, dass eine Magnetnadel oder ein Magnetstab, welcher so aufgehängt ist, 14
dass sich seine Längenaxe nur in einer horizontalen Ebene um eine verticale Axe drehen kann, immer eine bestimmte Stellung einnimmt, indem die magnetische Axe, die Verbindungslinie der beiden Pole, stets gegen einen bestimmten Punkt des Horizonts hinweist. Wird die Nadel durch irgend eine störende Kraft aus dieser Gleichgewichtslage herausgebracht und dann sich selbst überlassen, so kehrt sie nach einer Reihe von Oscillationen immer wieder in diese Gleichgewichtslage zurück.

Denken wir uns durch die magnetische Axe einer in ihrer Gleichgewichtslage befindlichen horizontalen Magnetnadel eine Verticalebene

gelegt, so heisst diese der magnetische Meridian. Der magnetische Meridian eines Ortes macht nun mit dem astronomischen Meridian einen Winkel, welchen man die Declination oder Missweisung nennt. Die Declination ist östlich oder westlich, je nachdem das Nordende der Nadel östlich oder westlich vom astronomischen Meridian liegt. Stellt z. B. *sn*, Fig. 29, den Meridian, *ab* aber die Richtung der horizontalen Magnetnadel dar, so ist die Declination eine westliche. Die westliche Declination beträgt in Deutschland gegenwärtig 12 bis 16°. Wir werden bald sehen, dass die Declination mit der Zeit sich ändert. Es giebt Orte auf der Erde, wo die Richtung der Magnetnadel vollständig mit dem Meridian zusammenfällt; an diesen Orten ist also die Declination gleich Null.

Ein Apparat, welcher dazu dient, die Declination zu messen, heisst eine Declinationsbussole oder ein Declinatorium.

Fig. 30 stellt eine solche Bussole ziemlich einfacher Art vor. Die Spitze, auf welche die Nadel aufgesetzt ist, bildet den Mittelpunkt eines

Fig. 29.

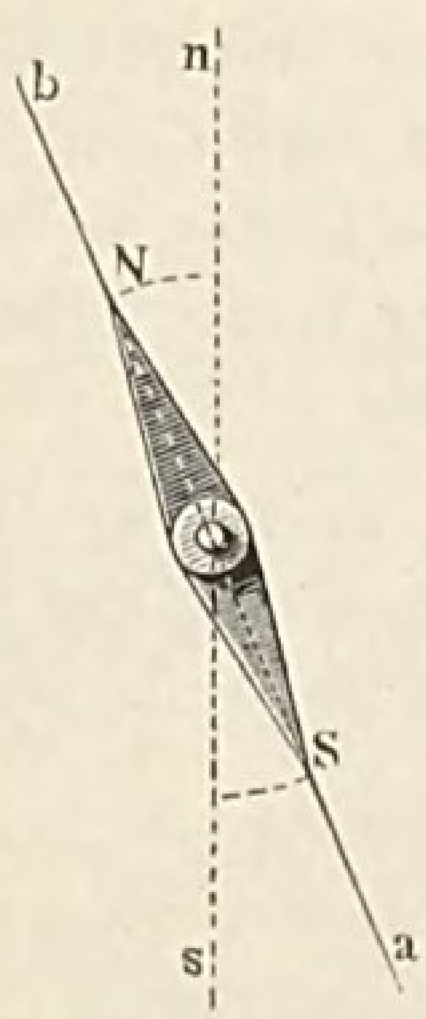
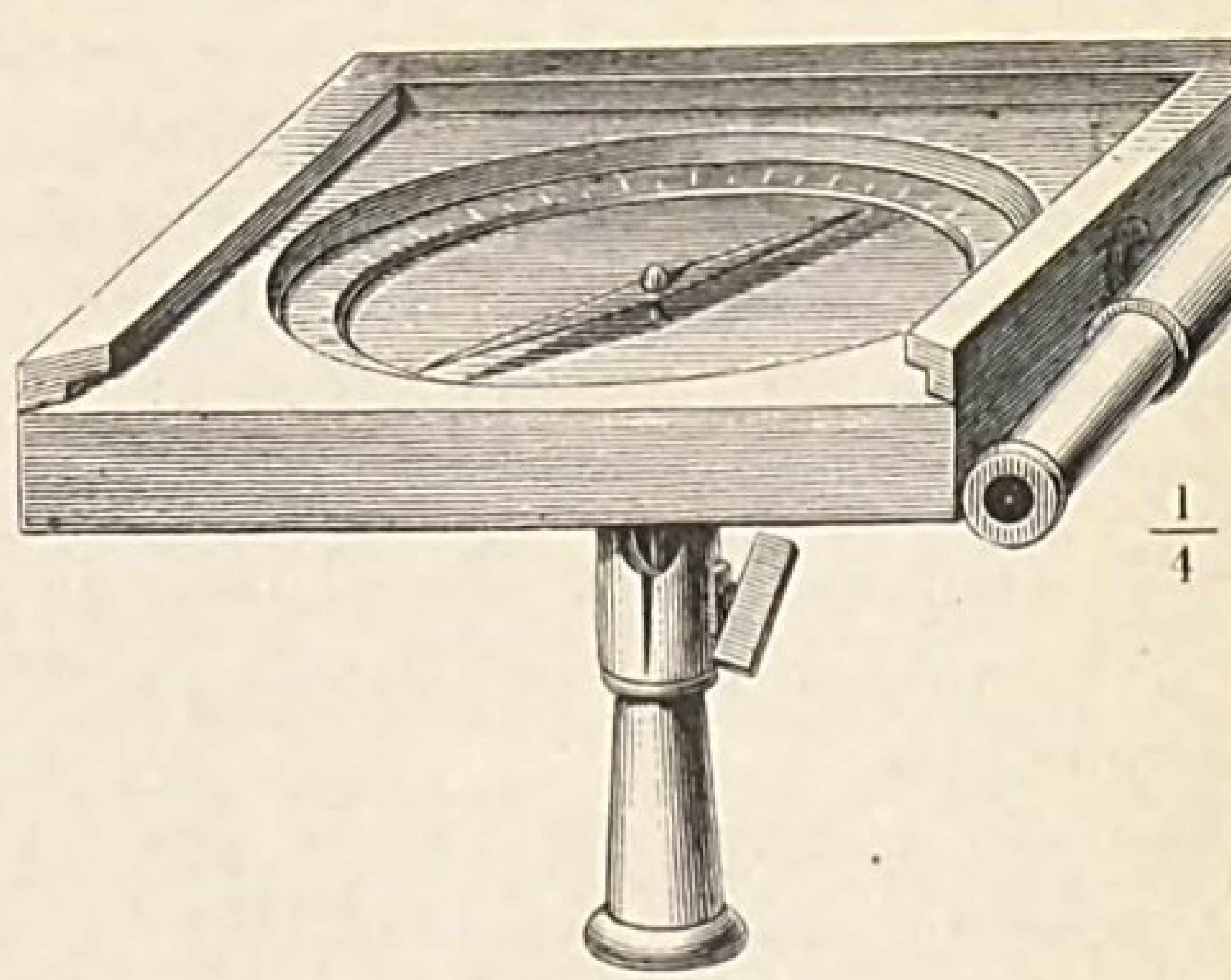


Fig. 30.

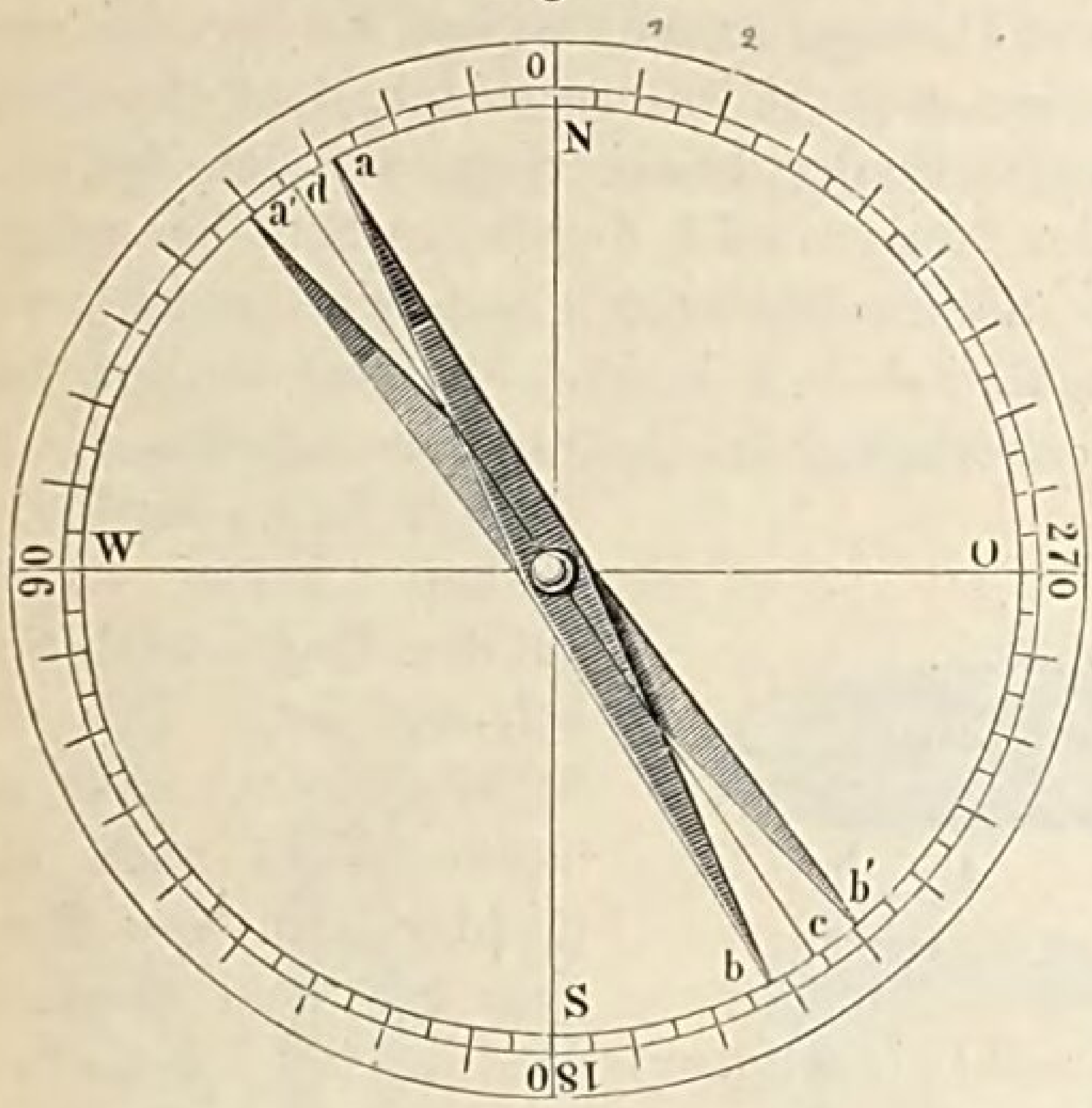


getheilten Horizontalkreises, welcher um eine verticale Axe in seiner eigenen Ebene umgedreht werden kann. An der Seite des Gehäuses ist ein Fernrohr angebracht, dessen Axe mit derjenigen Linie parallel läuft, welche man sich vom Nullpunkte des getheilten Kreises über seinen Mittelpunkt zum Theilstriche 180° gezogen denken kann. Je nachdem man den Horizontalkreis in seiner Ebene umdreht, wird die Spitze der Magnetnadel auf andere Theilstriche zu stehen kommen. Wenn man den Apparat so stellt, dass die Nadel gerade auf den Nullpunkt der Theilung zeigt, so ist die Axe des Fernrohrs mit der Nadel parallel, sie fällt mit dem magnetischen Meridian zusammen; bei jeder anderen Stellung aber zeigt die Nadel auf denjenigen Theilstrich des Kreises, welcher angiebt, wie viel Grade der Winkel beträgt, welchen die Richtung der Nadel mit der Axe des Fernrohrs (oder vielmehr der Horizontalprojection der Fernrohraxe) macht; wenn man also das Fernrohr genau in den astronomischen Meridian bringt, so kann man auf dem Theilkreise

ablesen, welchen Winkel der magnetische Meridian mit dem astronomischen macht.

Dieses Instrument kann nun überhaupt als Winkelmessinstrument dienen, weil man mit Hülfe desselben jederzeit den Winkel bestimmen kann, welchen die Visirlinie des Fernrohrs (oder vielmehr ihre Horizontalprojection) mit dem magnetischen Meridian macht.

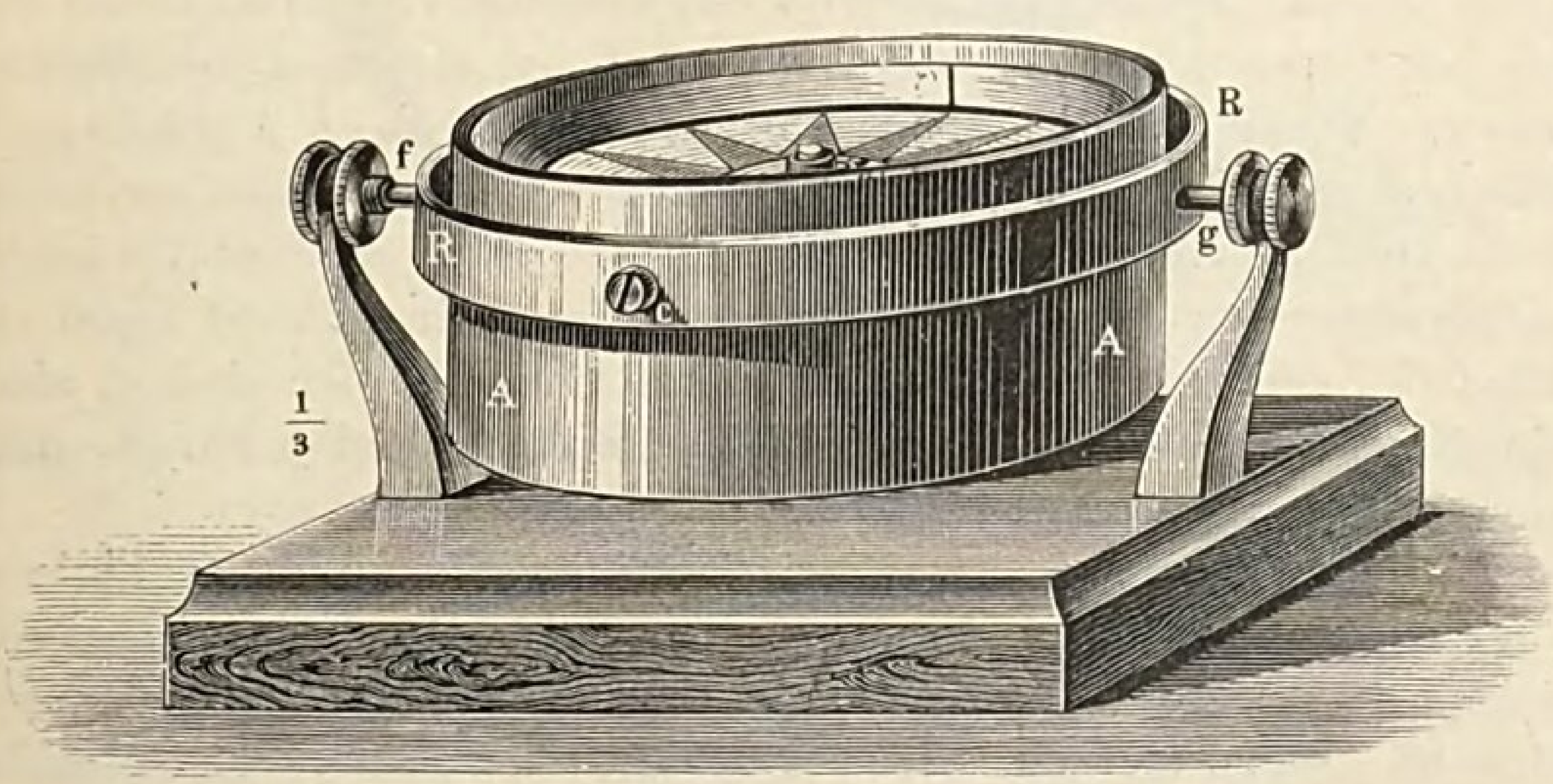
Fig. 31.



Die Bestimmung der magnetischen Declination mit Hülfe der eben beschriebenen **Bussole** wird mit einem constanten Fehler behaftet sein, wenn die magnetische Axe der Nadel nicht genau mit der geometrischen, d. h. der Verbindungslinie der beiden Spitzen, zusammenfällt. Dieser Fehler wird nun durch die **Methode des Umlegens** corrigirt.

Zu diesem Zwecke ist die Nadel nicht auf ihrem Hütchen befestigt, sondern nur aufgelegt, so dass man sie abnehmen, umkehren (d. h. die bis dahin nach oben gerichtete Fläche nach unten wenden) und dann wieder auflegen kann. In Fig. 31 stelle z. B. *ab* die

Fig. 32.



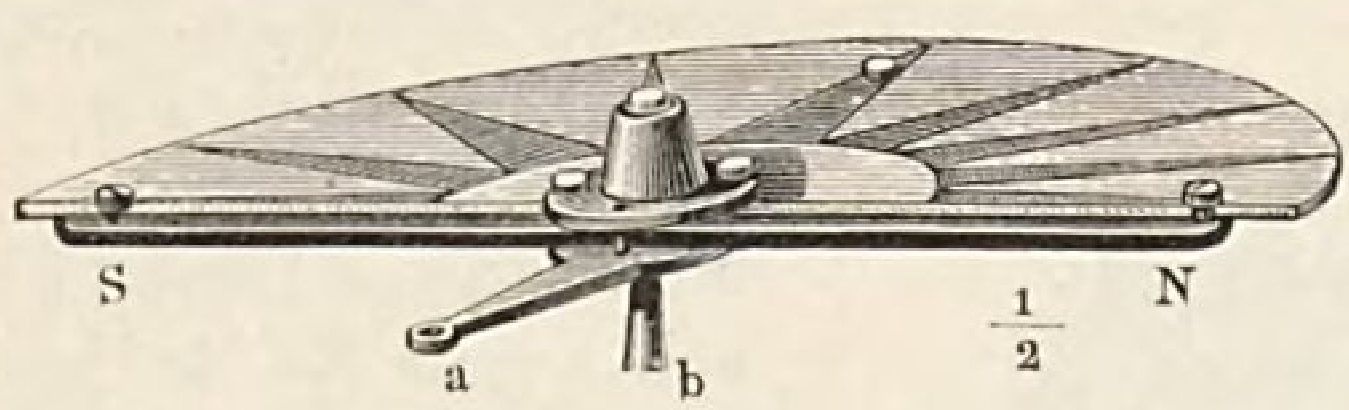
Lage einer horizontalen Magnetnadel dar; da deren magnetische Axe in die Linie *dc* fällt, so ist die Gradzahl, auf welche die Spitze *a* der Nadel deutet, offenbar kleiner als der gesuchte Declinationswinkel. Legt man aber nun die Nadel in der angegebenen Weise um, so nimmt sie jetzt

die Lage $a'b'$ an, und es deutet die Spitze a' der Nadel auf eine Gradzahl, welche um eben so viel zu gross ist, wie sie vorher zu klein war; man erhält also den wahren Werth der Declination, wenn man aus den beiden Ablesungen bei a und a' das Mittel nimmt.

Die Declinationsbussole, deren sich die Seefahrer bedienen, ist unter dem Namen des Compasses bekannt.

Fig. 32 (a. v. S.) stellt einen einfachen Seecompass dar, welcher sich von den bisher besprochenen Bussolen dadurch unterscheidet, dass die Theilung am Rande einer aus starkem Papier bestehenden auf der Magnetnadel befestigten, also mit der Magnetnadel drehbaren Scheibe aufgetragen ist. Häufig ist auch die Gradtheilung durch eine sogenannte Windrose ersetzt, wie dies z. B. bei dem in Fig. 32 dargestellten Instrumente der Fall ist. Fig. 33 zeigt, wie die fragliche Scheibe, deren vordere Hälfte der Deutlichkeit halber fehlt, auf dem Magnetstab SN befestigt ist. Um die Scheibe besser fest zu halten, wird noch ein leichter Arm von Messing mit dem Magnetstab so verbunden, dass er rechtwinkelig auf der Richtung desselben steht, und dann die Scheibe noch auf den Enden dieses Messingarmes (von denen in unserer Figur nur das vordere a sichtbar ist) aufgeschraubt.

Fig. 33.



Das Hütchen des Magnetstabes spielt auf der Spitze eines Stahlstiftes b, Fig. 33, welcher genau im Centrum des etwas dicken und schweren Bodens der Büchse A, Fig. 32, befestigt ist. Damit der Stift b trotz der Schwankungen des Schiffes möglichst eine verticale Stellung beibehalte, ist die Büchse A mit einer Cardanischen Aufhängung versehen, d. h. sie ist um zwei zu einander rechtwinkelige horizontale Axen drehbar. Zunächst hängt die Büchse in zwei diametral einander gegenüberstehenden Zapfen c und d, von denen in unserer Figur nur der Kopf des vorderen c sichtbar ist. Diese beiden Zapfen sind in einem Messingring R befestigt, welcher in den Zapfen f und g hängt, deren Verbindungslinie rechtwinkelig zu cd steht.

Der Compass ist nun so auf dem Schiff befestigt, dass die Linie cd, Fig. 31, mit der Richtung des Kieles parallel steht; ferner ist in der Verticalebene von cd an der inneren Wand der Büchse A eine Marke n angebracht. Wenn also der Kiel des Schiffes im magnetischen Meridian steht, so stellt sich die Magnetnadel dem Kiel parallel und der Nordpunkt der Windrose zeigt gerade auf die Marke n; wenn aber der Schiffskiel eine andere Richtung hat, so wird irgend ein anderer Punkt der Windrose auf die Marke n zeigen, aus dem man entnehmen kann, welchen Winkel der Schiffskiel mit dem magnetischen Meridian macht.

Magnetische Inclination. Die Magnetnadeln, welche wir bisher betrachtet haben, sind in einer Weise aufgehängt, dass sie sich nur in einer horizontalen Ebene, also um eine verticale Axe, drehen können. Sowohl bei der in Fig. 4 und 5 als auch bei der in Fig. 3 dargestellten Aufhängung ist die nahezu horizontale Stellung dadurch gesichert, dass der Schwerpunkt der Nadel unter dem Aufhängepunkt liegt. Sobald man aber eine Magnetnadel in ihrem Schwerpunkte selbst aufhängt, bleibt sie nicht mehr wagerecht stehen, sondern sie macht einen Winkel mit der Horizontalen, welcher den Namen der Inclination führt. 15

Der Fig. 34 abgebildete Apparat ist sehr geeignet, die Inclination der Magnetnadel zu zeigen. An einem Rahmen von Messing, welcher an einem Faden aufgehängt ist, befindet sich eine sehr leicht bewegliche

Fig. 34.

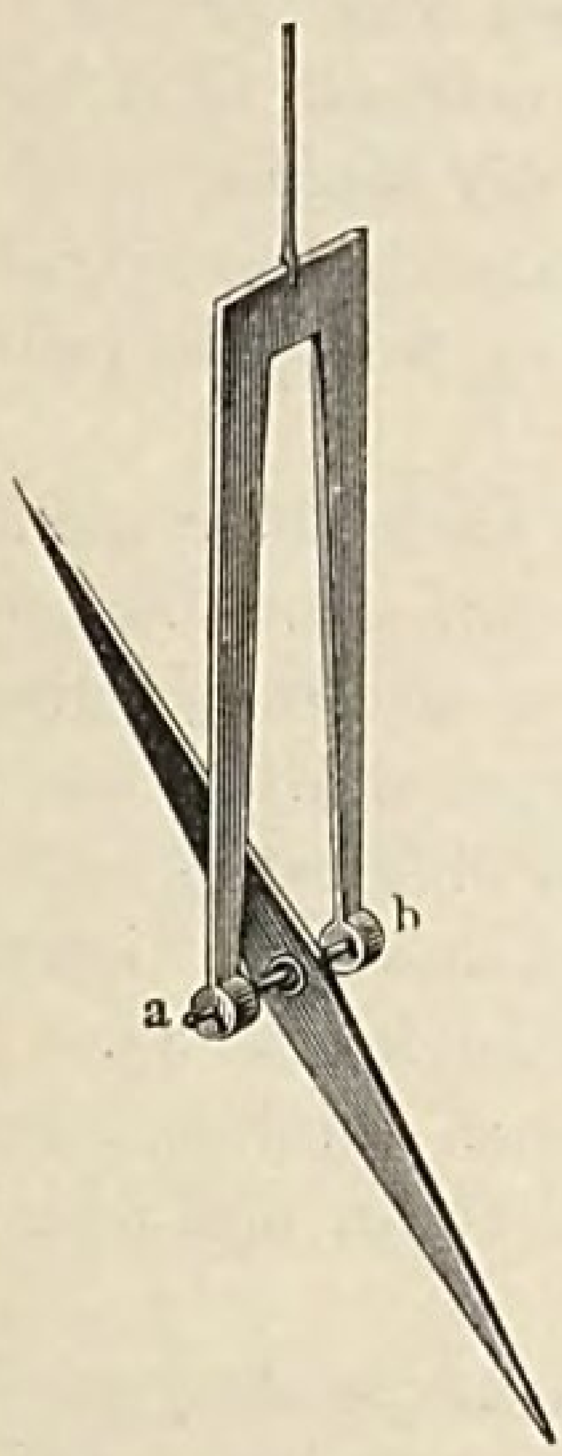
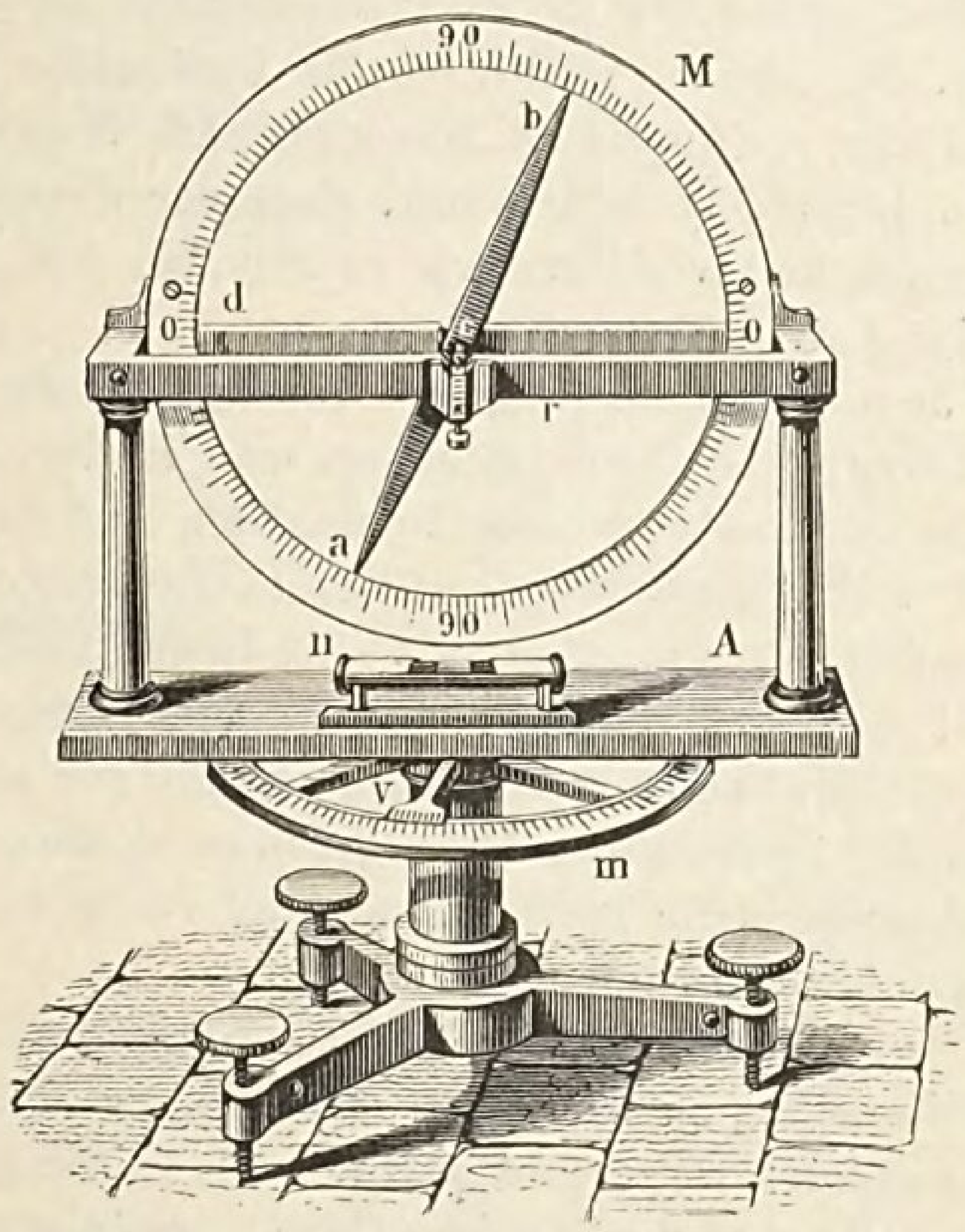


Fig. 35.



horizontale Axe ab, welche durch den Schwerpunkt einer Magnetnadel geht. Man sieht, dass eine so aufgehängte Magnetnadel um eine verticale und um eine horizontale Axe sich drehen und also dem richtenden Einflusse der Erde ganz frei folgen kann. Die Nadel stellt sich nun so, dass ihre Richtungslinie in den magnetischen Meridian fällt; das nach Norden gekehrte Ende der Nadel aber senkt sich, die Richtungslinie der Nadel macht also einen Winkel mit der Horizontalen, der in unseren Gegenden ungefähr 70^0 beträgt.

Wenn die Inclinationsnadel in einem getheilten Verticalkreise angebracht ist, dessen Ebene mit der Umdrehungsebene der Nadel zusammenfällt, wie Fig. 35, so kann man auf diesem Kreise die Grösse der In-

clination ablesen, wenn man dafür sorgt, dass die Ebene des Verticalkreises genau in den magnetischen Meridian fällt.

Solche Apparate, welche dazu dienen, die Inclination zu messen, heissen Inclinatorien oder Inclinationsbussolen.

Auch bei den Inclinationsbussolen muss man, um möglichst genaue Resultate zu erhalten, die Methode des Umlegens in Anwendung bringen, d. h. nachdem man die erste Ablesung gemacht hat, muss man die Nadel von ihrer Unterlage abheben und so wieder aufsetzen, dass die Seite, welche bisher die östliche war, nun die westliche wird, und danach eine zweite Ablesung vornehmen.

Die Grösse der Inclination nimmt im Allgemeinen zu, je mehr man nach Norden kommt; so beobachtete z. B. Capitän Philipps im Jahre 1773 unter 79° 44′ nördlicher Breite eine Inclination von 82° 9′ und Parry unter 70° 47′ eine Inclination von 88° 43′. Capitän Ross endlich hat unter 70° 5′ N. B. und 263° 14′ östlich von Greenwich den Punkt der Erde erreicht, wo die Inclination 90° beträgt. Dieser Punkt heisst der magnetische Nordpol. Die Neigung der Magnetnadel ist in hohen Breiten so bedeutend, dass der Compass für die Seefahrer seine Brauchbarkeit verliert, wie es sich bei den letzten Nordpolexpeditionen gezeigt hat.

Je weiter man hingegen von unseren Breiten nach Süden geht, desto mehr nimmt die Inclination ab, und in der Aequatorialzone kommt man zu einem Punkte, wo die Inclination Null ist, wo also die Inclinationsnadel vollkommen wagerecht steht; geht man noch weiter nach Süden, so beobachtet man abermals eine Inclination, aber eine entgegengesetzte; es ist nun das nach Süden gekehrte Ende, welches sich tiefer stellt. Diese Inclination nimmt ebenfalls mit der südlichen Breite zu. In der Nähe des Südpols der Erde giebt es demnach einen zweiten Punkt, an welchem sich die Inclinationsnadel völlig vertical stellt, und dies ist der magnetische Südpol der Erde.

In welcher geographischen Länge man auch die Aequatorialzone passiren mag, so wird man doch immer einen Punkt finden, wo die Inclinationsnadel wagerecht steht. Diese Orte ohne Inclination bilden um die ganze Erde eine Curve, welche man den magnetischen Aequator nennt.

Der magnetische Aequator fällt nicht mit dem Erdäquator zusammen und bildet auch keinen regelmässigen grössten Kreis der Erdkugel. Näheres über den Verlauf des magnetischen Aequators in der kosmischen Physik von C. F. W. Peters.

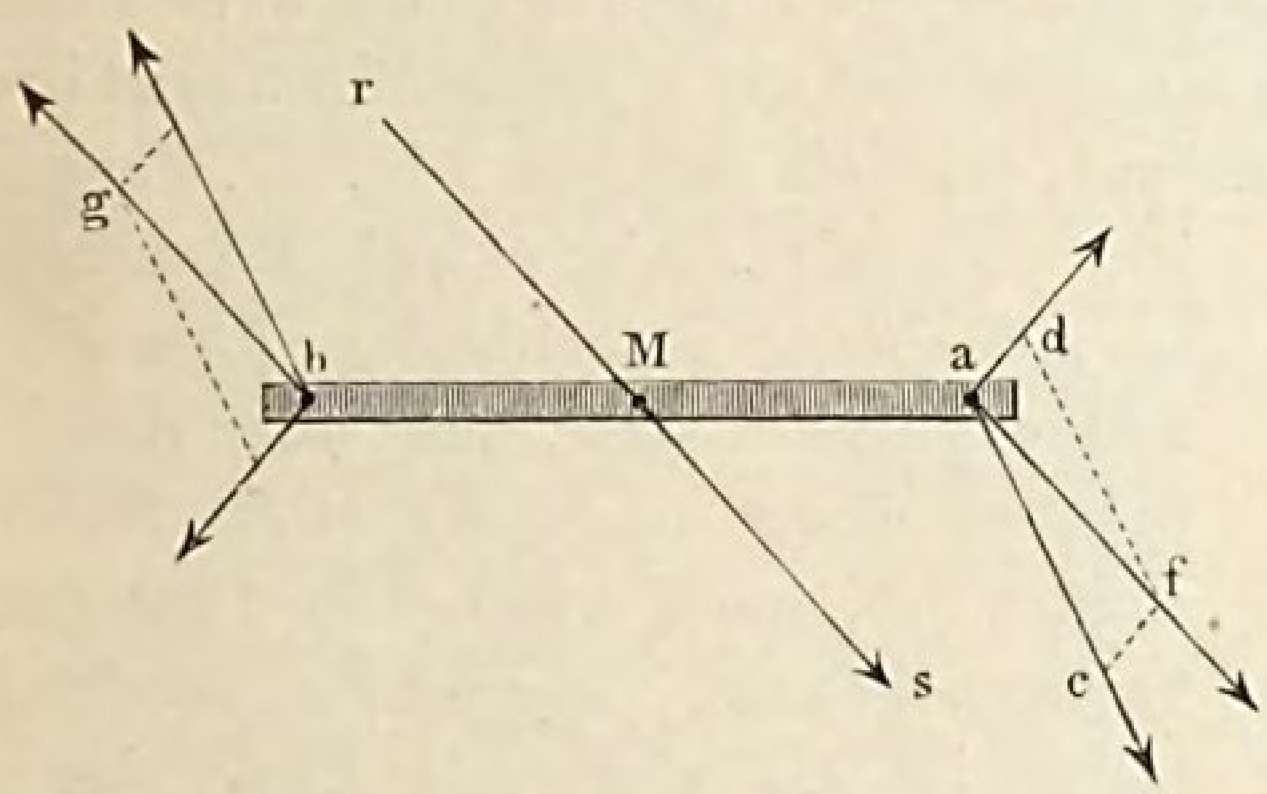
Die Entdeckung der Inclination wird gewöhnlich einem Engländer, Robert Normann, zugeschrieben, der wenigstens im Jahre 1576 ein Inclinatorium construirt hat. Schon 33 Jahre früher aber kannte Georg Hartmann, Vicar zu St. Sebald in Nürnberg, die Inclination der Magnetnadel. Ihm ist auch die Entdeckung des Gesetzes zuzuschreiben, dass gleichnamige Polaritäten sich abstossen, ungleichnamige sich anziehen.

Richtende Kraft des Erdmagnetismus. Die Totalwirkung, 16 welche die Erde auf eine Magnetnadel ausübt, ist, wie wir bereits im §. 2 bemerkt haben, nur eine richtende, aber keine anziehende, denn wenn letzteres der Fall wäre, so müsste eine Magnetnadel mehr wiegen als vorher, da sie noch nicht magnetisch gemacht worden war. Wenn man eine Magnetnadel auf einen Kork legt, welcher auf Wasser schwimmt, so stellt sie sich in den magnetischen Meridian, sie zeigt aber kein Bestreben, nach Norden zu schwimmen, weil die Entfernung der beiden Pole der Nadel vom magnetischen Nordpol der Erde so nahe gleich ist, dass die anziehende Wirkung desselben auf den einen Nadelpol vollkommen der abstossenden Wirkung auf den anderen gleich ist.

Annähernd kann man die magnetischen Wirkungen der Erde durch die Annahme erklären, dass sie in der Verbindungslinie der magnetischen Pole einen Magnet enthalte, oder dass sie selbst ein Magnet sei, welcher im Norden einen magnetischen Südpol, im Süden einen magnetischen Nordpol besitzt.

Welches auch die Lage der magnetischen Pole der Erde (der Mittelpunkte der magnetischen Kräfte) sein mag, so üben doch beide einen Einfluss auf die beiden Pole des Magnets aus. Es sei *ab*, Fig. 36, eine Magnetnadel, *a* der eine, *b* der andere Pol derselben. Der Nordpol der Erde wirkt anziehend auf den Pol *a* in einer Richtung, die wir nicht ermitteln können, die wir aber durch die Linie *ac* darstellen wollen. Auf denselben Pol *a* der

Fig. 36.



Nadel wirkt aber der Südpol der Erde abstossend in der Richtung *ad* (die auch nicht ermittelt werden kann). Weil wir nun in unseren Gegenden dem Nordpol der Erde näher sind als dem Südpol, so ist die Anziehung stärker als die Abstossung; die beiden Kräfte verbinden sich nach dem Gesetze des Parallelogramms der Kräfte zu einer Resultirenden *af*. Auf den Pol *b* der Nadel wirkt nun der Nordpol der Erde abstossend, und zwar in derselben Richtung und mit derselben Stärke, wie er den Pol *a* anzieht; der Südpol der Erde zieht aber den Pol *b* in derselben Richtung und mit derselben Stärke an, wie er den anderen abstösst. Die beiden Kräfte, welche den Pol *b* angreifen, sind also den beiden in *a* angreifenden Kräften parallel, gleich und entgegengesetzt, mithin müssen auch die Resultirenden *bg* und *af* parallel, gleich und entgegengesetzt sein. Wenn aber die um ihren Schwerpunkt *M* frei drehbare Nadel in ihren Polen von zwei gleichen, parallelen und entgegengesetzten Kräften angegriffen wird, so werden sie nur eine Dre-

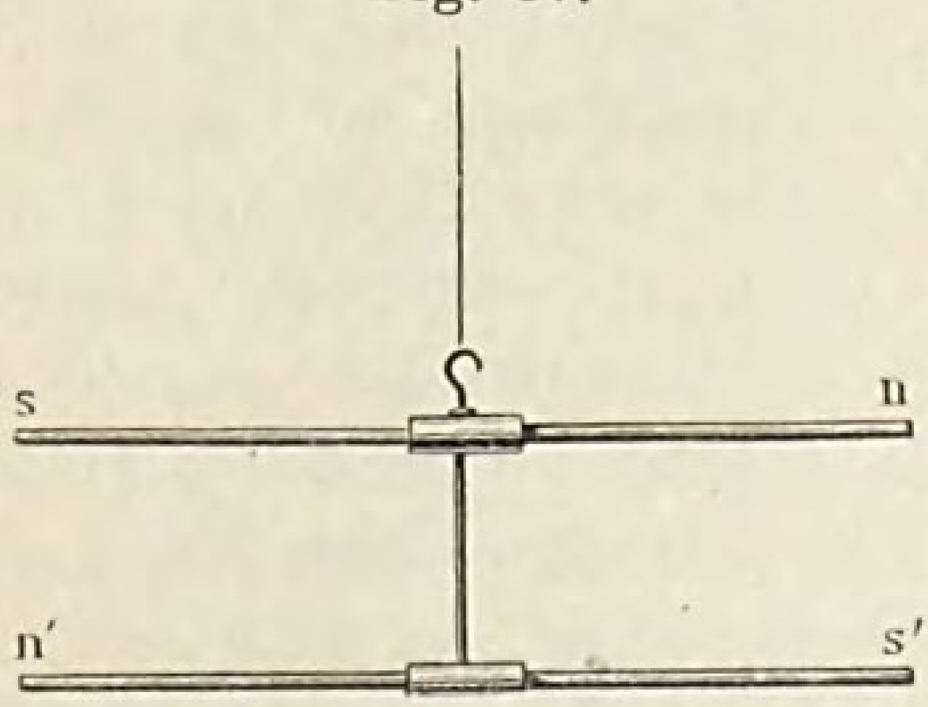
hung der Nadel um ihren Schwerpunkt bewirken können; sie werden dieselbe in die Richtung *rs* bringen, welche mit der Richtung der Resultirenden *af* und *bg* parallel ist.

Diese Gleichgewichtslage beobachteten wir nun an der Inclinationsnadel; die Richtung der Inclinationsnadel fällt mit der Resultirenden der auf die Nadel wirkenden magnetischen Kräfte der Erde zusammen.

Bei der Declinationsnadel ist ein Theil der Wirkung der magnetischen Erdkräfte durch die Art, wie die Nadel aufgehängt ist, aufgehoben, bei derselben kommt nur die horizontale Componente der die Nadel richtenden magnetischen Erdkraft zur Wirkung, und diese horizontale Componente wird natürlicher Weise um so geringer sein, je mehr die Inclination wächst. Je weiter man sich also vom magnetischen Aequator entfernt, um so geringer ist die Kraft, welche die Declinationsnadel richtet.

17 **Astatische Nadeln.** Für mancherlei Versuche, namentlich wenn es sich darum handelt, schwache galvanische Ströme nachzuweisen, ist es von Wichtigkeit, Magnetnadeln zu haben, welche, selbst stark magnetisch, nur durch eine geringe Kraft in dem magnetischen Meridian zurückgehalten werden. Gewöhnlich erreicht man diesen Zweck dadurch, dass man statt einer einzigen Magnetnadel ein sogenanntes astatisches Nadelpaar in Anwendung bringt, wie ein solches Fig. 37 dargestellt ist. Es sind hier zwei Magnetnadeln so mit einander verbunden, dass sie einander parallel sind, dass aber der Nordpol der einen nach derselben Seite gerichtet ist, nach welcher der Südpol der anderen schaut. Bei einem solchen Systeme ist die richtende Kraft des Erdmagnetismus ausserordentlich gering, denn sie ist nur die Differenz der Kräfte, mit welchen der Erdmagnetismus jede einzelne Nadel zu richten strebt. Wäre das magnetische Moment der beiden Nadeln vollkommen gleich, so würde die richtende Kraft, welche die Erde auf ein solches System ausübt, gleich Null sein.

Fig. 37.



Man hat verschiedene Methoden angewendet, um die beiden Nadeln in der erwähnten gegenseitigen Lage mit einander zu verbinden. Eine der einfachsten und zweckmässigsten Vorrichtungen ist die in unserer Figur dargestellte. Die Nadeln sind in zwei Hülsen eingeschoben, welche aus dünnem Charnierdraht von Silber gemacht und durch ein Stäbchen von Silberdraht verbunden sind.

Statt eine Nadel auf die eben erwähnte Weise durch Combination mit einer zweiten nahezu gleich starken astatisch zu machen, kann man diesen Zweck auch dadurch erreichen, dass man in den magnetischen Meridian einer einfachen Magnetnadel einen Magnetstab legt, wie

Fig. 38 darstellt, welcher die Wirkung des Erdmagnetismus nahezu neutralisirt.

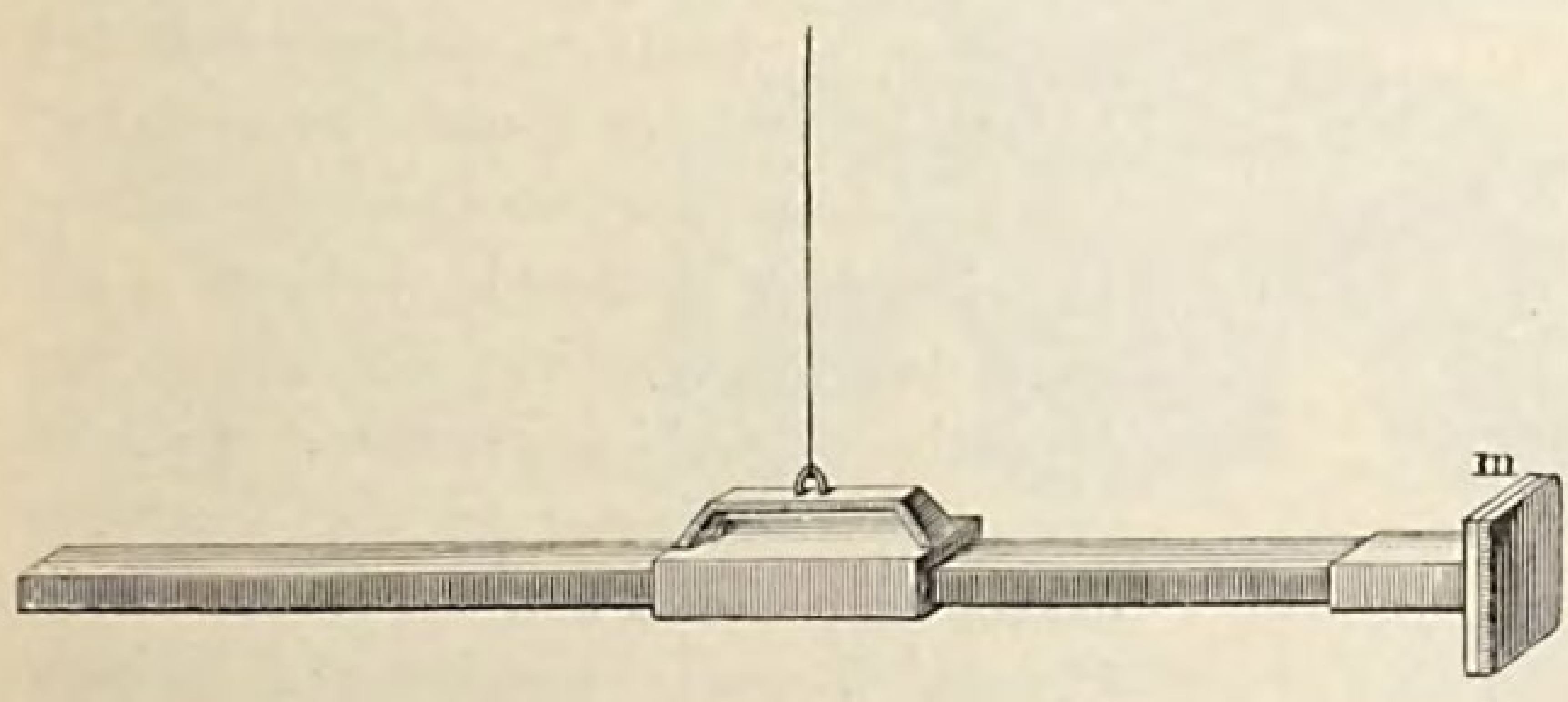
Während der Erdmagnetismus die Nadel so stellt, das ihr Nordpol in *n*, ihr Südpol in *s* ist, würde der Magnetstab *NS* bei der in unserer Figur dargestellten Lage die Nadel gerade umkehren, also ihren Nordpol nach *s* bringen. Bei einem bestimmten Abstande des Stabes wird er dem Erdmagnetismus vollkommen das Gleichgewicht halten, die Nadel ist alsdann vollkommen astatisch; wenn man aber den Magnetstab mehr und mehr von der Nadel entfernt, so wird auch die richtende Kraft des Erdmagnetismus auf dieselbe wieder mehr zur Geltung kommen. Kurz man hat es auf diese Weise ganz in seiner Gewalt, durch Annähern oder Entfernen des Stabes *NS* die richtende Kraft der Erde beliebig zu verkleinern. Statt in der in Figur 38 dargestellten Stellung kann der astasirende Magnet auch nördlich von der Nadel sowie parallel mit derselben östlich oder westlich mit gleichliegenden Polen aufgestellt werden. Wir kommen hierauf später zurück.

Fig. 38.



Das Magnetometer. Die Genauigkeit, mit welcher 18
man die Lage des magnetischen Meridians mittelst einer Bussole bestimmen kann, hängt begreiflicher Weise unter Anderem auch von dem Durchmesser des getheilten Kreises, also von der Länge der Nadel ab; diese darf man aber nicht zu lang machen, weil sie sonst zu schwer und die Reibung auf der Stahlspitze zu gross wird. Somit ist begreiflich, dass man mit einer solchen Bussole keine bedeutende Genauigkeit erreichen kann; eine ganz neue Epoche für die Untersuchung der Gesetze des Magnetismus und namentlich des Erdmagnetismus begann deshalb, als Gauss durch die Construction seines Magnetometers es möglich machte, die Richtung der horizontalen Magnetnadel mit astronomischer Genauigkeit zu bestimmen und die geringsten Veränderungen derselben zu beobachten. Er erreichte dies dadurch, dass er statt der auf Spitzen spielenden Magnetnadel Magnetstäbe anwandte, welche er an einem Metalldrahte oder an einem Bündel ungedrehter Seidenfäden aufhing und an denselben die Poggendorff'sche Spiegelvorrichtung anbrachte. Der Spiegel *m* befindet sich entweder an dem einen Ende des Magnetstabes, wie bei dem

Fig. 39.



Magnetometer, Fig. 39 (a. v. S.), oder er ist an der Aufhängevorrichtung angebracht, wie Fig. 40.

Dem Spiegel gegenüber, dessen Ebene, wie wir zunächst annehmen wollen, rechtwinkelig auf der magnetischen Axe des Magnetstabes steht,

Fig. 41.

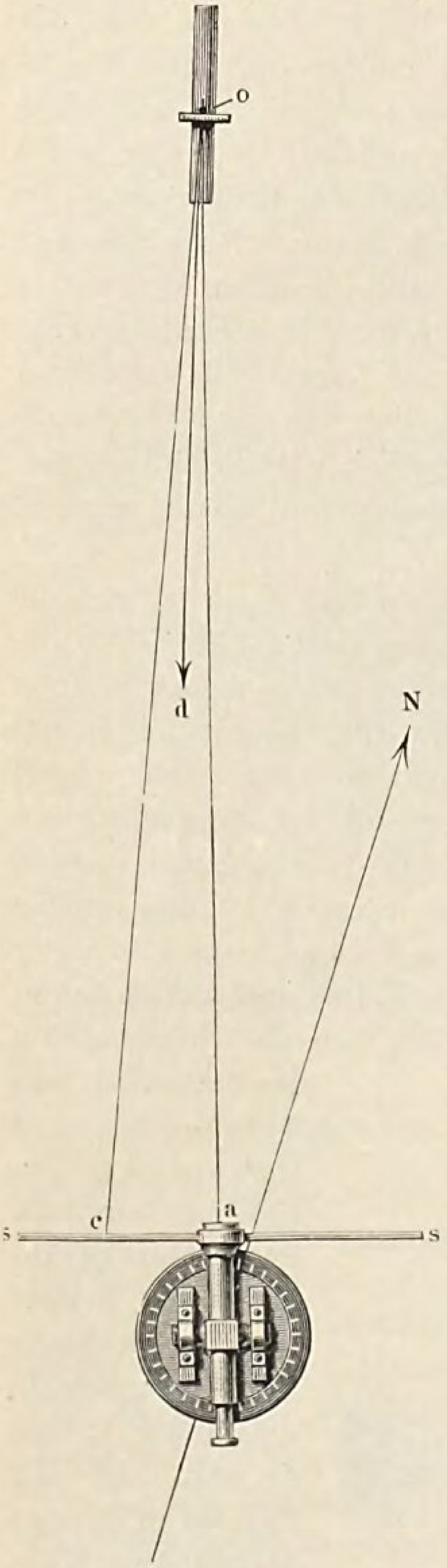
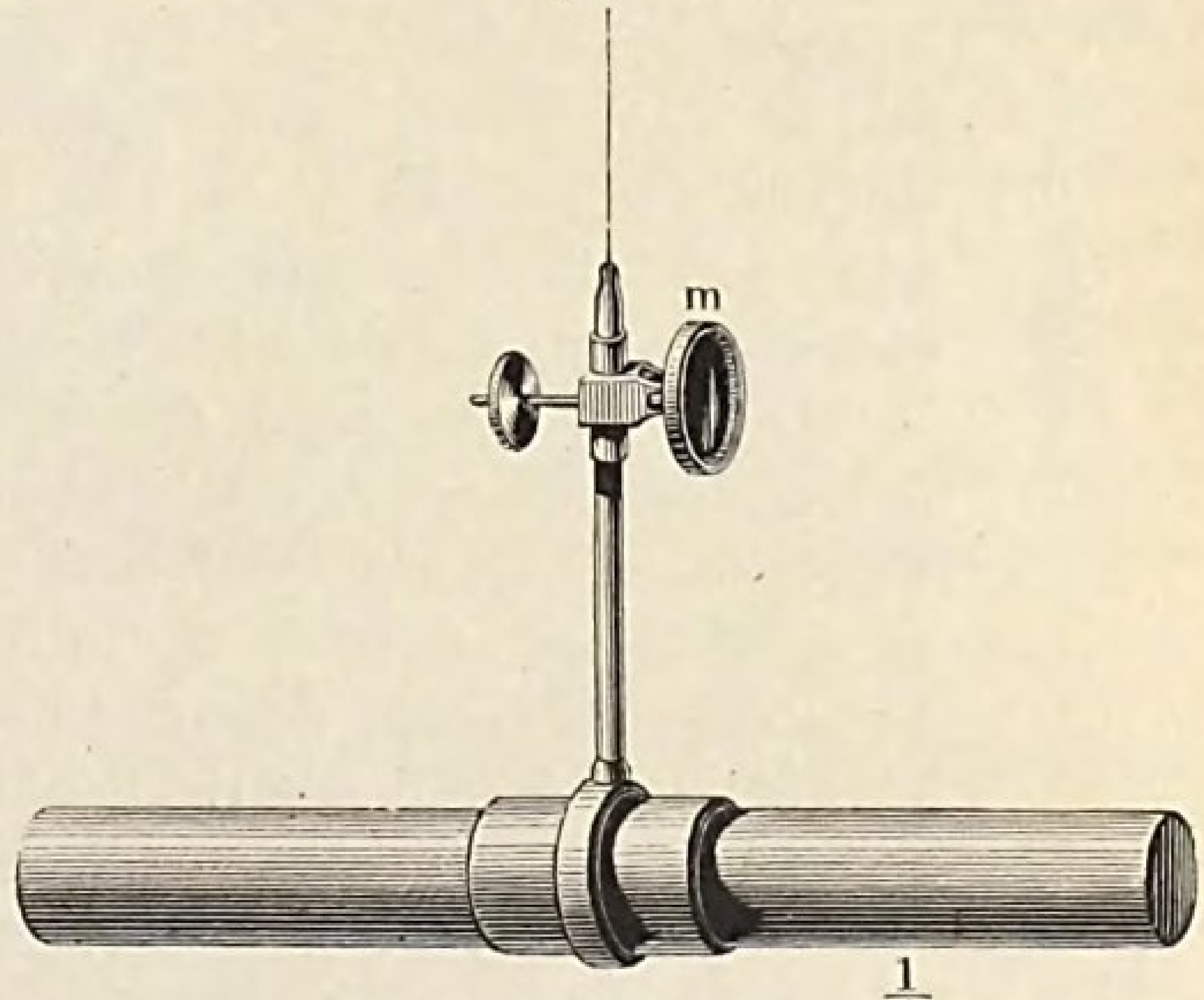


Fig. 40.



wird in einer Entfernung von 1,5 bis 5 m ein Theodolit aufgestellt, ungefähr wie es in Fig. 41 angedeutet ist. Die optische Axe des Fernrohrs ist etwas höher als der Magnetstab und so abwärts geneigt, dass sie gegen die Mitte des Spiegels gerichtet ist.

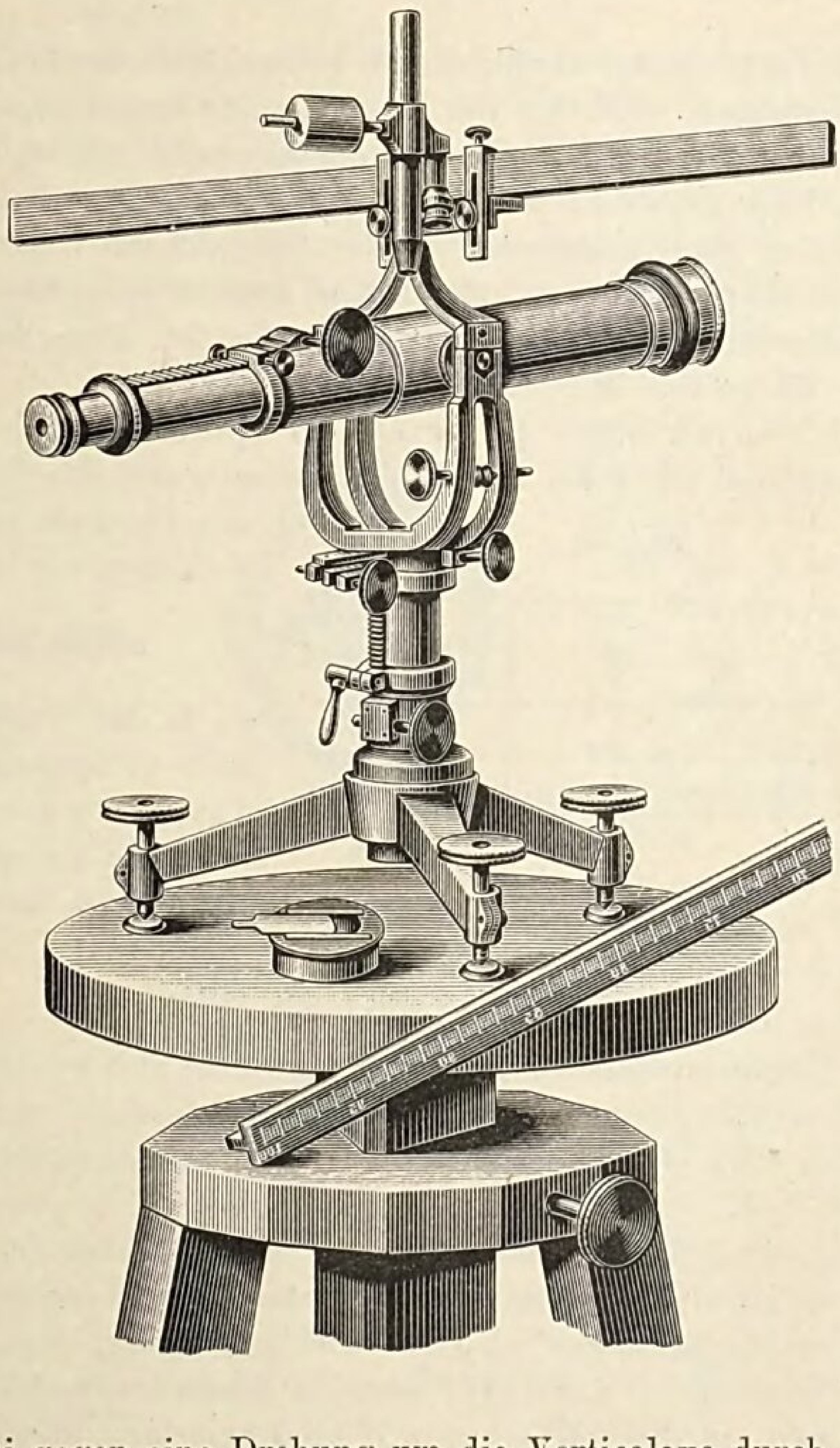
Am Stativ des Theodolits ist eine 1 m lange, in Millimeter getheilte horizontale Scala befestigt, die nahezu parallel mit dem horizontalen Durchmesser des Spiegels ist. Derjenige Punkt *a* der Scala *ss*, welcher mit der optischen Axe des Fernrohrs in einer Verticalebene liegt und hier der Kürze wegen der Mittelpunkt heissen mag, wird durch einen vor der Mitte des Objectivs herabhängenden, mittelst eines Messingringes an der Fassung desselben befestigten, unten durch ein kleines Gewicht beschwerten feinen Draht von dunkler Farbe bezeichnet.

Die Scala ist in einer solchen Höhe befestigt, dass das Bild eines Theils derselben im Spiegel durch das Fernrohr gesehen wird.

Da derartige Winkelmessungen mit Spiegel und Scala sehr häufig vorkommen, so verwendet man hierzu vortheilhaft statt des Theodoliten

eigene Ablesefernrohre. Fig. 42 zeigt ein solches mit vollständiger Ausrüstung aus dem mechanisch-optischen Institut von Hartmann und Braun. Das Fernrohr ist hierbei um verticale und horizontale Axe grob und fein drehbar, ausserdem mittelst Zahnstange und Trieb höher und tiefer zu stellen. Das Ocular ist weit ausziehbar. Die durch Gegengewicht balancirte Scala kann ebenfalls gehoben und gesenkt werden

Fig. 42.



und ist hierbei gegen eine Drehung um die Verticalaxe durch eine Nuth gesichert. Die Zahlen der Scala sind, wie aus Fig. 43 (a. f. S.) zu ersehen, verkehrt geschrieben, so dass ihr Spiegelbild aufrecht erscheint.

Die ganze Aufstellung ist nun so gemacht, dass die Verticalebene der optischen Axe des Fernrohrs, in welcher auch die verticale Drehungs-

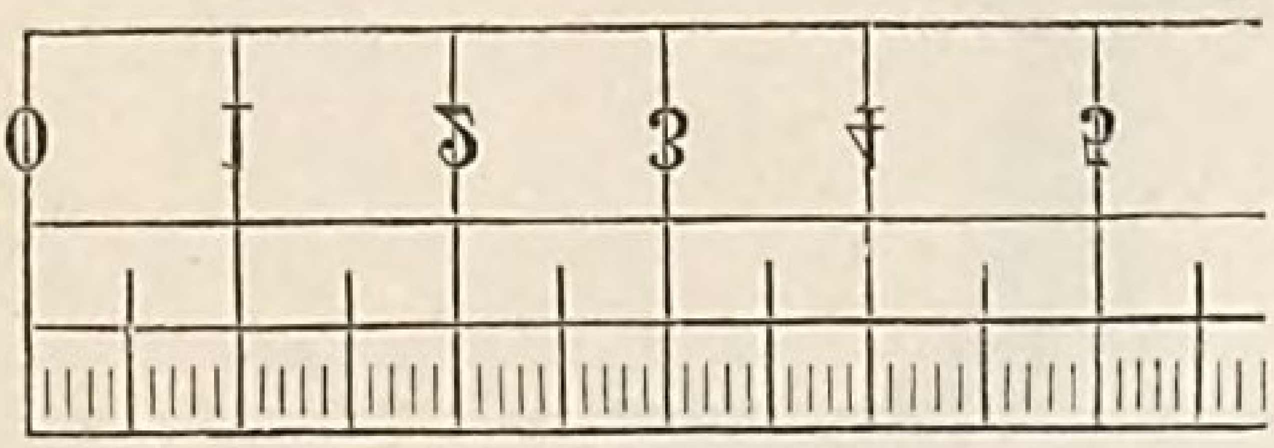
axe des Magnetstabes liegen muss, mit dem vorläufig annähernd genau bestimmten magnetischen Meridian zusammenfällt.

Wenn die Axe des Magnets wirklich genau mit der Verticalebene des Fernrohrs zusammenfällt, so erscheint das Bild des vor der Mitte der Scala hängenden Fadens in der Axe des Fernrohrs; sobald aber der Magnetstab aus dieser Ebene abweicht, erscheinen andere Theilstriche am verticalen Faden des Fadenkreuzes im Fernrohr, so dass man die geringste Abweichung mit Sicherheit erkennen und auch messen kann.

Erscheint statt des erwähnten Mittelpunktes a der Scala der Punkt c am Fadenkreuz, so wird der von c ausgehende Strahl co vom Spiegel in der Richtung oa reflectirt. Ein auf der Ebene des Spiegels errichtetes Perpendikel od muss den Winkel coa halbiren; doa aber ist offenbar dem Winkel v gleich, um welchen der Spiegel, um welchen also auch die Axe des Magnetstabes aus der Ebene des vorläufig bestimmten magnetischen Meridians ao herausgedreht worden ist, dieser Winkel ist also gleich der Hälfte des Winkels coa.

Bezeichnen wir mit n die Anzahl der Millimeter, welche zwischen a und c liegen und mit l die in Millimetern ausgedrückte Entfernung ao des Spiegels von der Scala, so haben wir offenbar

Fig. 43.



$$tang\, v = \frac{n}{2\,l},$$

da ja der Winkel $coa = 2\,v$ noch klein genug ist, um die Tangenten den Winkeln proportional zu setzen.

Wäre z. B. $ca = 10$ mm und $co = 5000$ mm, so hätte man

$$tang\, v = \frac{10}{10000} = 0{,}001,$$

also $v = 206$ Secunden. Für $n = 1$ mm wäre also $v = 20{,}6$ Secunden.

Eine ausführliche Anleitung zur Winkelmessung mit Spiegel und Scala findet sich in F. Kohlrausch, Leitfaden der praktischen Physik 6. Aufl., S. 161.

Ein geübtes Auge kann sehr gut noch Zehntel eines Millimeters schätzen; es ist also möglich, mittelst dieser Vorrichtung die Abweichung der Axe des Magnetstabes, also des wirklichen magnetischen Meridians, von der Ebene ao bis auf zwei Secunden genau zu bestimmen.

Hat man auf diese Weise den Winkel gemessen, welchen der magnetische Meridian od mit der Verticalebene oa der Fernrohraxe macht, so kann man nun leicht auch den genauen Werth der magnetischen Declination finden, wenn man mit Hülfe des Theodolits den Winkel misst, welchen die Verticalebene ao mit dem durch den Mittelpunkt des Theodolits gelegten astronomischen Meridian NS macht,

dessen Lage nach der im Band I, Seite 71 beschriebenen Methode zu bestimmen ist*).

Das eben beschriebene Verfahren setzt voraus, dass die Ebene des Spiegels *m* genau rechtwinkelig auf der magnetischen Axe des Stabes stehe, was wohl mit absoluter Genauigkeit kaum zu erreichen ist. Zwar ist die Stellung des Spiegels an dem in Fig. 40 dargestellten Magnetometer durch drei Schrauben regulirbar, welche in unserer Figur weggelassen sind; allein dieses Reguliren ist selbst nur durch die Methode des Umlegens möglich.

Die Methode des Umlegens kann bei Magnetometern aber nur dann angewandt werden, wenn der Spiegel fest mit dem Magnetstab verbunden ist, so dass er beim Umlegen des Stabes mit umgedreht wird, wie dies z. B. bei dem Magnetometer Fig. 39 der Fall ist, wenn man den Stab aus der Hülse herausnimmt, und ihn so umkehrt, dass die Fläche, welche zuerst die obere war, nun die untere wird. Fig 44 zeigt eine andere Einrichtung des Magnetometers, bei welcher ebenfalls die Methode des Umlegens anwendbar ist; je nachdem man diese Vorrichtung in dem einen oder in dem anderen Haken aufhängt, befindet sich der Magnetstab über oder unter dem Spiegel.

Fig. 44.

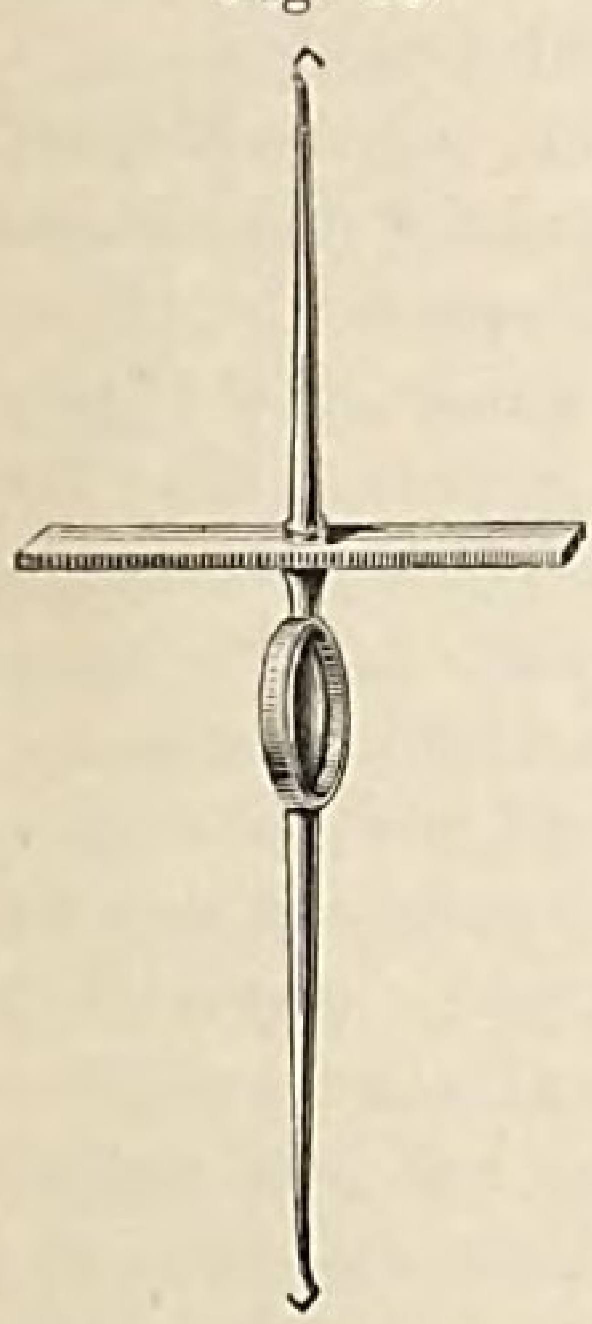
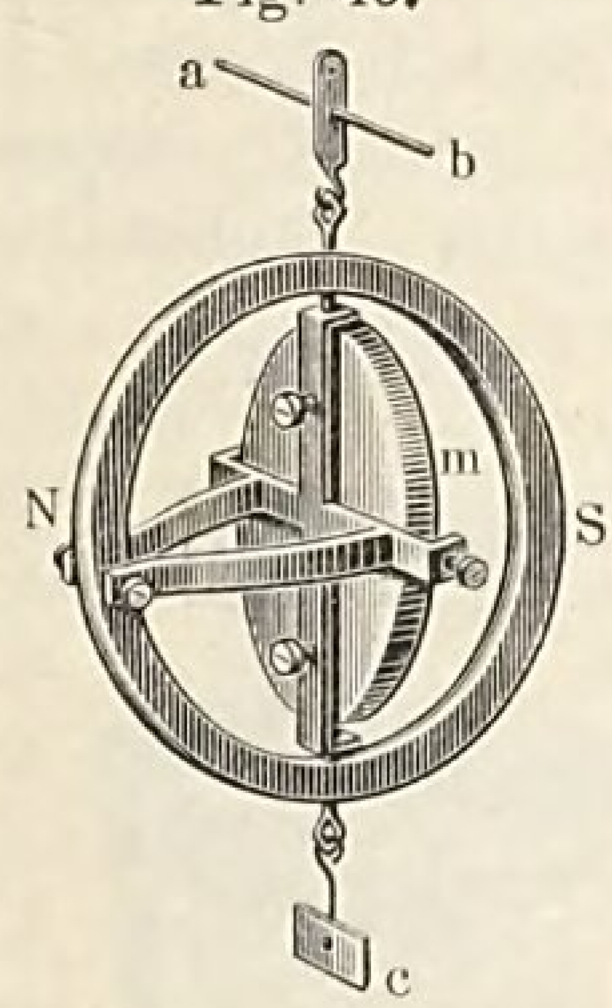


Fig. 45.



Edelmann hat bei seinem transportablen Magnetometer **) einen umlegbaren Magnet mit Spiegel in der beistehend, Fig. 45, abgebildeten Form angewendet.

Der Magnet *NS* hat die Form eines Ringes. Der Spiegel *m* ist um eine verticale und eine horizontale Axe drehbar innerhalb des Ringes derart aufgehängt, dass man seine Lage allseitig mittelst Stellschräubchen corrigiren und fixiren kann. *ab* ist eine Schweinsborste, welche nach Hebung des Aufhängefadens sich an das untere Ende des Umhüllungsrohrs anlegt und dadurch die Bewegungen hemmt, während das

*) Die daselbst gegebene Formel für die Correction bei Sonnenbeobachtungen ist durch die richtigere

$$\frac{1}{\cos \varphi} \cdot \frac{\varepsilon \tau}{24} \cdot \frac{1}{\sin 15\, \tau}$$

zu ersetzen, wo τ den halben Zeitunterschied der beiden Beobachtungen in Stunden bedeutet. In unseren Breiten genügt es meist, die Correction $= 0{,}27\, \varepsilon$ zu setzen.

**) Neuere Apparate etc. I, S. 42.

Instrument transportirt wird. *c* ist eine kleine Metallplatte, welche als Dämpfer (siehe unten) dient.

Bei dem Magnetometer, Fig. 40, lässt sich die Methode des Umlegens nicht in Anwendung bringen; eine solche Vorrichtung wird aber auch nicht gebraucht, um den absoluten Werth der magnetischen Declination zu bestimmen, sondern nur, um die Variationen in der Richtung des Magnetstabes genau zu messen, welche entweder durch Aenderungen im Erdmagnetismus, oder durch andere Magnetstäbe oder auch durch galvanische Ströme hervorgebracht werden. Zu diesem Zwecke ist es auch ganz gleichgültig, welchen Winkel die Spiegelebene mit dem magnetischen Meridian macht.

Nachdem wir nun gesehen haben, wie man mit Hülfe des Magnetometers die magnetische Declination bestimmen kann, wollen wir die Construction dieses wichtigen Apparates noch etwas näher betrachten.

Gauss wandte zu seinen Magnetometern Stahlstäbe von 2,5 bis 12,5 kg an; dieselben sind mittelst eines Stahldrahtes oder mittelst eines Bündels ungedrehter Seidenfäden an der Decke des Beobachtungslocales aufgehängt und, um sie vor Luftströmungen zu schützen, von einem achteckigen Gehäuse umgeben, welches nur zwei Oeffnungen hat; die eine oben, um den Aufhängefaden durchzulassen, die andere an der Stelle der Seitenwand, welche dem Spiegel gegenübersteht, um durch dieselbe nach dem Spiegel hinsehen zu können. Letztere Oeffnung ist mit einer geschliffenen Glasplatte geschlossen.

Fig. 46.

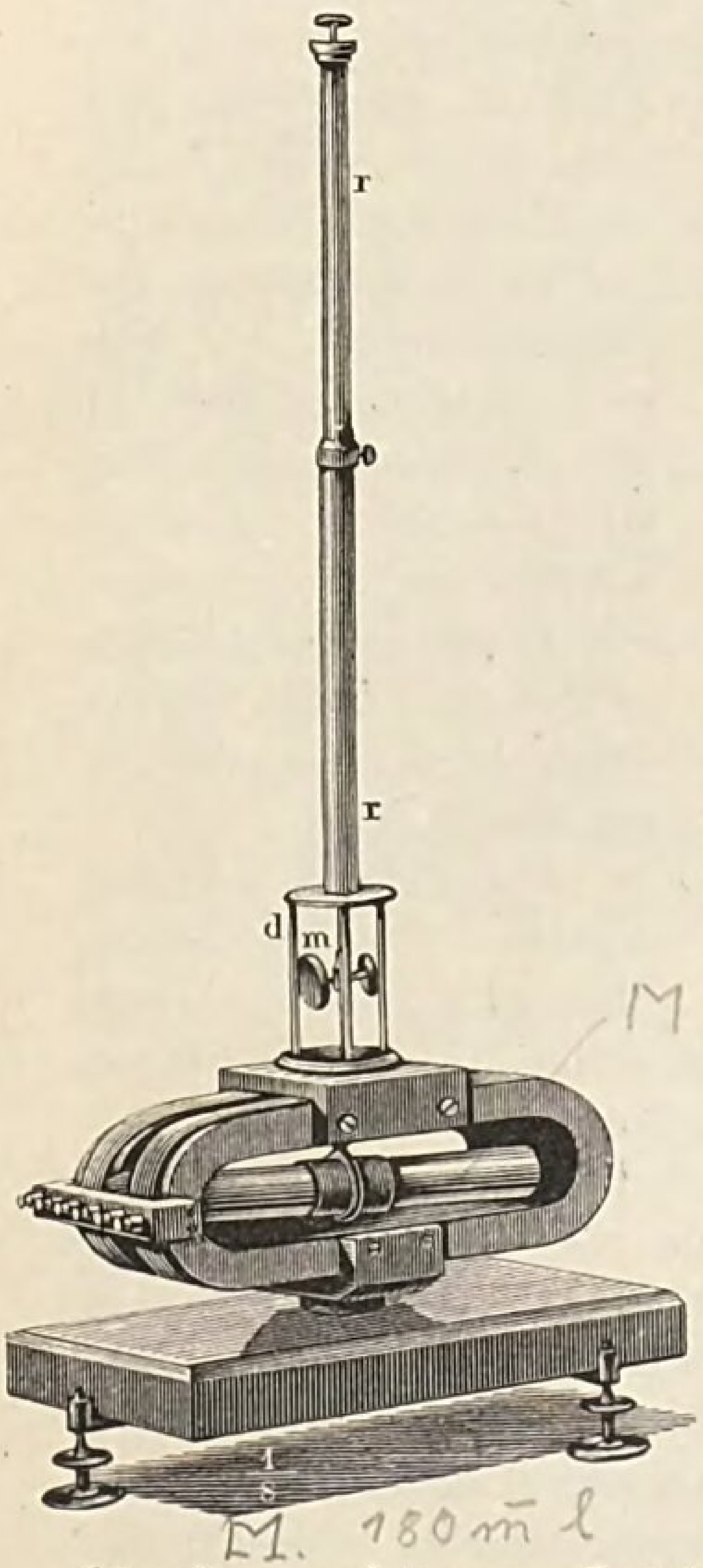


Fig. 47.

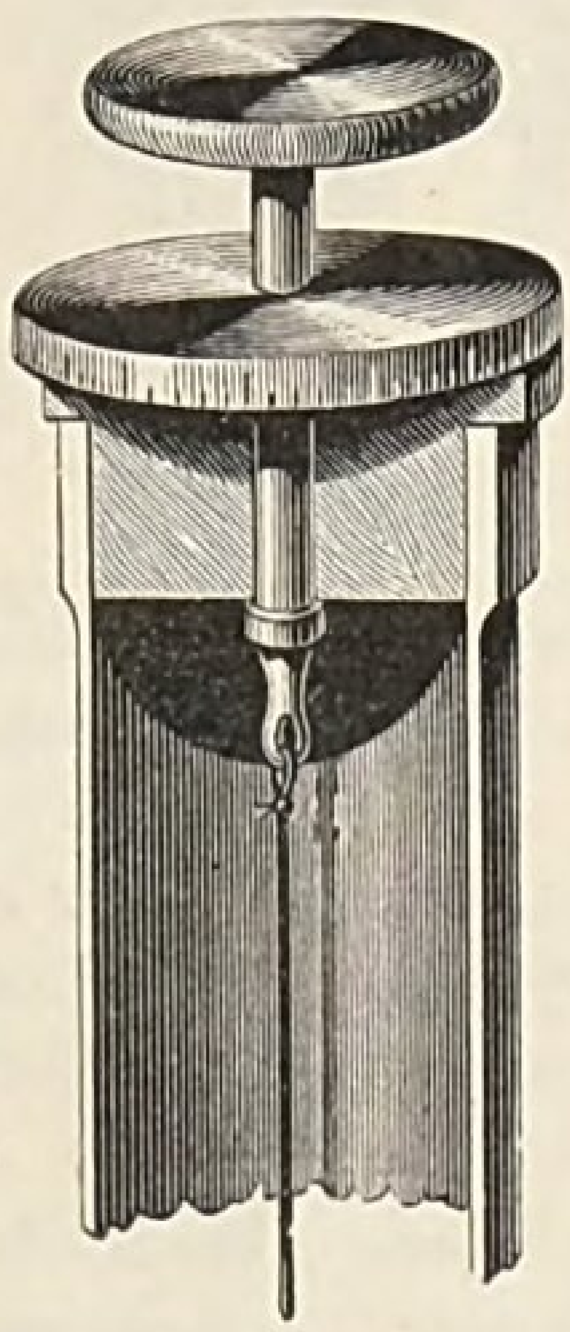


Fig. 46 stellt ein von Leyser in Leipzig ausgeführtes transportables Magnetometer dar; wie an dem 18 cm langen Magnetstabe die Spiegelvorrichtung angebracht ist, haben wir bereits in Fig. 40 gesehen. Ein Bündel ungedrehter Seidenfäden, welches den Magnetstab trägt, ist an der oberen Deckplatte des kupfernen Rohres *r* befestigt. Der Magnetstab selbst hängt in einem länglichen Gehäuse von starkem Kupfer-

blech, welches oben ein Loch hat, um das Aufhängungsstäbchen durchzulassen, und dessen seitliche Oeffnungen, welche in unserer Figur offen geblieben sind, damit man den Magnetstab besser sehen kann, durch Glasfenster geschlossen sind. Auch die Stelle bei *d* wird mit einem Blechcylinder umgeben, welcher nur dem Spiegel gegenüber eine mit einer geschliffenen Glasplatte verschlossene Oeffnung hat. Das Gehäuse, in welchem der Magnet spielt, ist mit mehreren Lagen von übersponnenem Kupferdraht umwickelt, dessen Zweck erst später besprochen werden kann.

Bei genaueren Untersuchungen ist es nothwendig, dass der Aufhängefaden vollkommen ohne Torsion sei, wenn der Magnetstab im magnetischen Meridian steht, dass also, wenn man den Magnetstab durch einen nicht magnetischen, etwa durch einen Messingstab ersetzte, derselbe auch im magnetischen Meridian bliebe. Um nun zu bewirken, dass der Faden für die richtige Einstellung des Stabes wirklich torsionsfrei sei, muss man den oberen oder unteren Anknüpfungspunkt des Fadens so weit drehen können, bis diese Bedingung erreicht ist. Fig. 47 stellt die an dem Magnetometer, Fig. 46, zu diesem Zwecke angebrachte Vorrichtung (Torsionskopf) dar.

Was die Beobachtung am Magnetometer betrifft, so ist noch folgende wichtige Bemerkung zu machen: Der Magnetstab steht in der Regel nicht fest im magnetischen Meridian, sondern er oscillirt um seine Gleichgewichtslage, und zwar sind die Oscillationen um so langsamer, je bedeutender die Masse des Magnetstabes ist; die Gleichgewichtslage des Magnetstabes ergiebt sich demnach auch nicht aus einer einzigen Ablesung, wie oben angenommen wurde, sondern man findet dieselbe, indem man das Mittel zwischen den Grenzen nimmt, innerhalb welcher der Stab hin und her schwingt.

Da nun aber dieser Umstand die Beobachtungen sehr erschwert, so hat man gesucht, diese Schwankungen möglichst zu reduciren, was durch die sogenannte D ä m p f u n g gelungen ist. Man umgiebt nämlich den Stab mit einem möglichst massiven kupfernen Bügel (das kupferne Gehäuse des Apparates), und dieser bewirkt, dass, wenn der Stab auch in Schwingungen gerathen ist, dieselben doch sehr rasch kleiner werden und der Stab eine fast stationäre Stellung annimmt, wie es bei dem obigen Apparate wirklich der Fall ist. In welcher Weise der kupferne Dämpfer dies bewirkt, kann erst später bei Gelegenheit der Inductionsströme erläutert werden. Eine andere Methode der Dämpfung beruht darauf, dass man ein in der Axenrichtung nach abwärts angesetztes Metallplättchen in eine Flüssigkeit (Glycerin) tauchen lässt.

Der magnetische Meridian ist keineswegs, wie bisher angenommen wurde, eine unveränderlich feste Ebene, wie der astronomische Meridian, sondern er ist in beständigen Schwankungen begriffen, welche an gewöhnlichen Bussolen freilich nicht wahrnehmbar sind, zu deren Beobachtungen aber das eben beschriebene Magnetometer sich ganz vorzüg-

lich eignet. Will man nun diese Variationen beobachten, nicht aber den absoluten Werth der Declination bestimmen, so ist es nicht mehr nöthig, dass der Spiegel rechtwinkelig zur Axe des Magnetstabes befestigt ist; er kann dann jeden beliebigen Winkel mit dem magnetischen Meridian machen und das Beobachtungsfernrohr braucht alsdann auch nicht mehr in der Verlängerung des Stabes zu liegen, sondern kann seitlich aufgestellt werden, wie es eben bei den disponiblen Localitäten bequem ist.

19 **Der magnetische Theodolit.** Um auch auf Reisen die magnetischen Constanten bestimmen zu können, bedarf man solcher Apparate, welche bei möglichster Genauigkeit doch möglichst compendiös und leicht transportabel sind. In dieser Beziehung hat sich vor Allen Lamont durch die Construction seines magnetischen Reisetheodolits grosse Verdienste erworben.

Fig. 48.

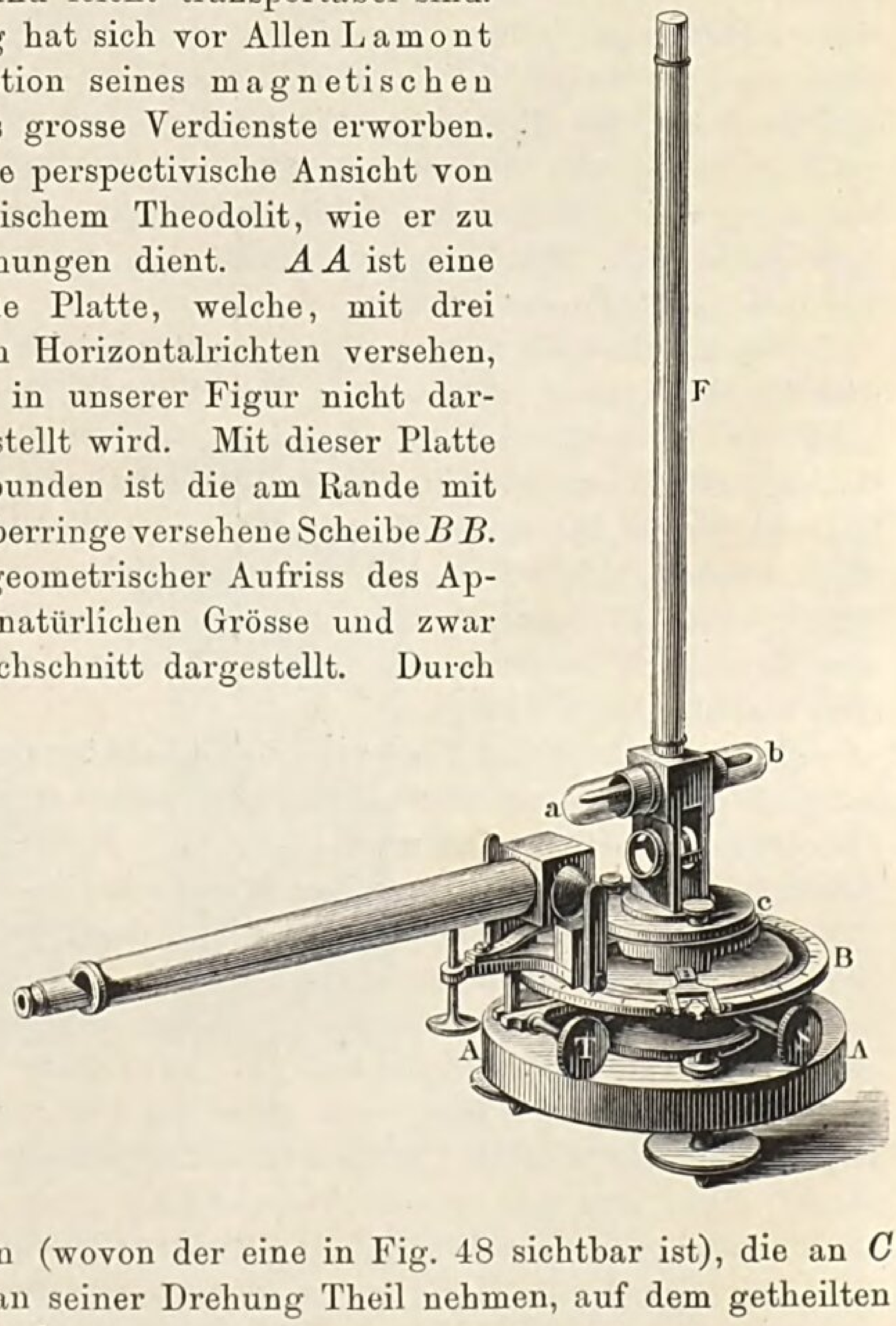
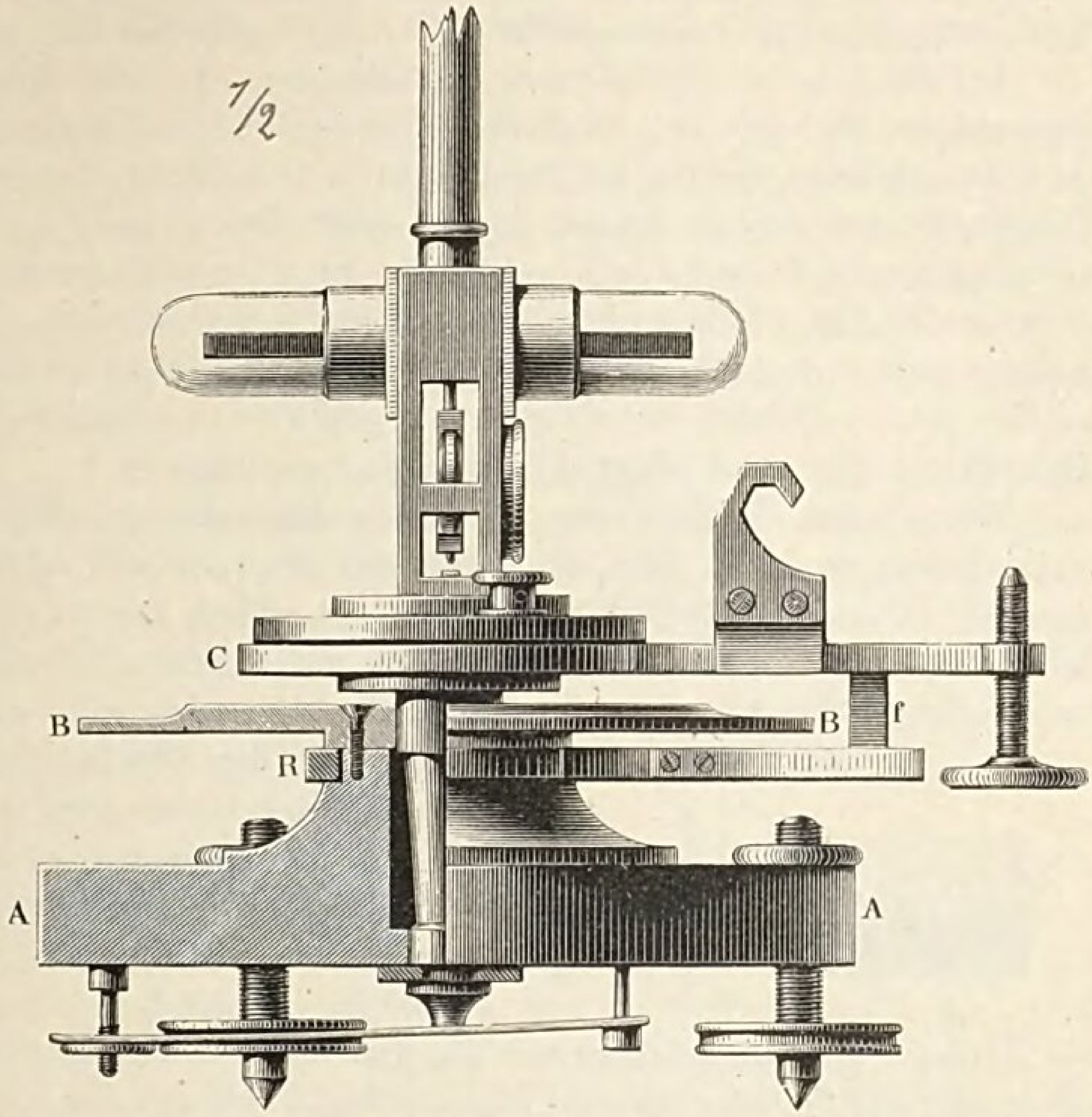


Fig. 48 ist eine perspectivische Ansicht von Lamont's magnetischem Theodolit, wie er zu Declinationsbestimmungen dient. AA ist eine massive messingene Platte, welche, mit drei Stellschrauben zum Horizontalrichten versehen, auf ein passendes, in unserer Figur nicht dargestelltes Stativ gestellt wird. Mit dieser Platte unveränderlich verbunden ist die am Rande mit einem getheilten Silberringe versehene Scheibe BB. In Fig. 49 ist ein geometrischer Aufriss des Apparates in $^1/_2$ der natürlichen Grösse und zwar zum Theil im Durchschnitt dargestellt. Durch die Höhlung der Platte AA hindurch geht eine verticale Axe, welche die Scheibe C trägt. Die Scheibe C kann in ihrer Ebene um diese verticale Axe gedreht werden, und diese Drehung mit Hülfe zweier Nonien (wovon der eine in Fig. 48 sichtbar ist), die an C befestigt sind und an seiner Drehung Theil nehmen, auf dem getheilten Kreise abgelesen werden.

An der Scheibe C ist eine horizontale Verlängerung angebracht, welche als Fernrohrträger dient. Eine horizontale Axe, um welche sich das Fernrohr drehen kann, wird durch eine messingene Feder (überhaupt

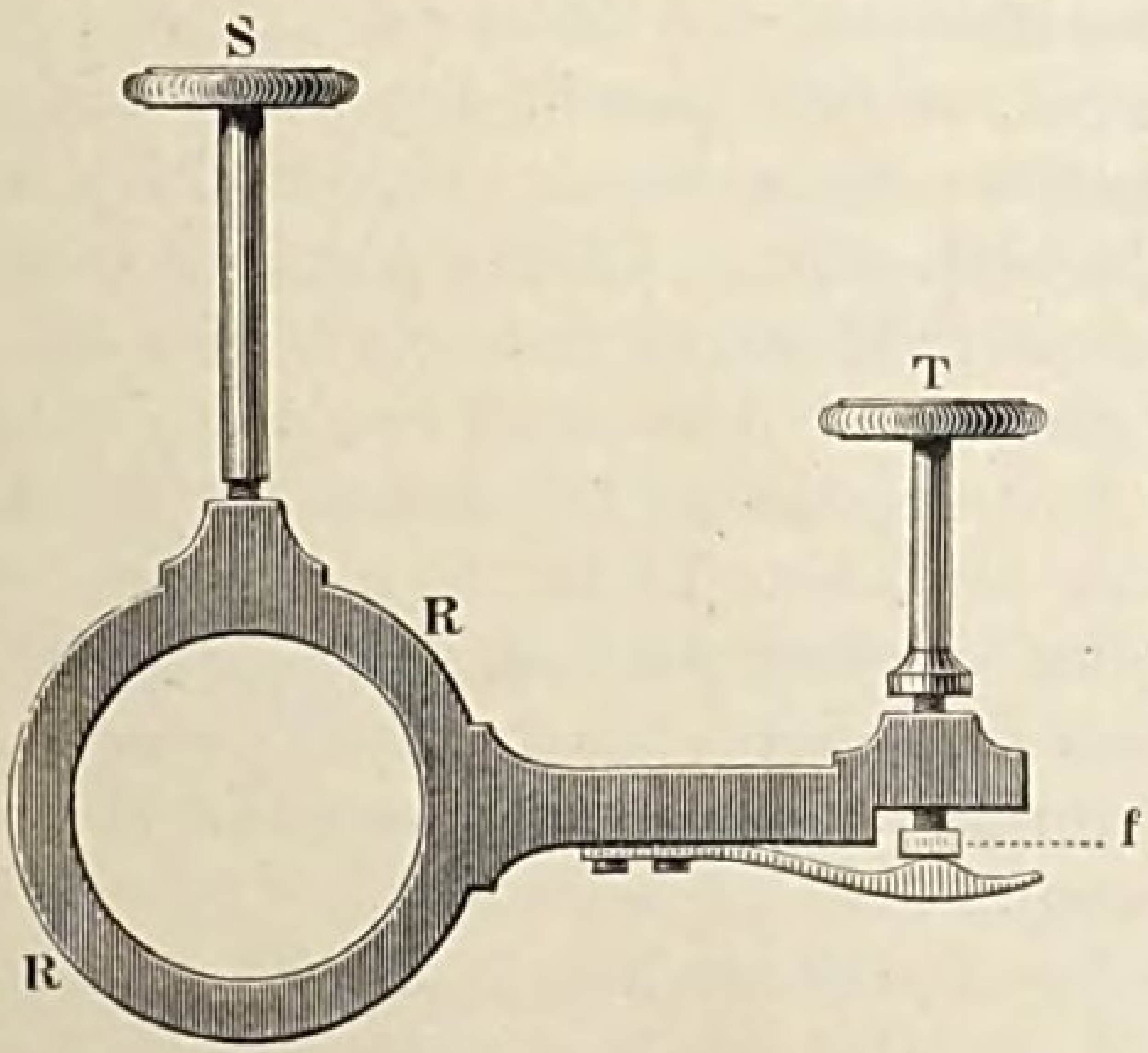
kommt ausser dem Magnetstäbchen am ganzen Apparate kein Eisen vor) von unten gegen den in Fig. 49 sichtbaren Haken angedrückt. Vor

Fig. 49.



diesem Haken befindet sich noch eine Messingplatte, welche in Fig. 49 der Deutlichkeit wegen fortgeblieben ist, welche man aber in der perspectivischen Ansicht erkennt und welche dazu dient, eine seitliche Bewegung der Fernrohraxe zu verhindern. Ferner geht von dieser das Fernrohr tragenden Verlängerung noch ein Stäbchen f herab, welches zwischen eine Verlängerung des Ringes R und eine an denselben angeschraubte Messingfeder hineinpasst.

Fig. 50.



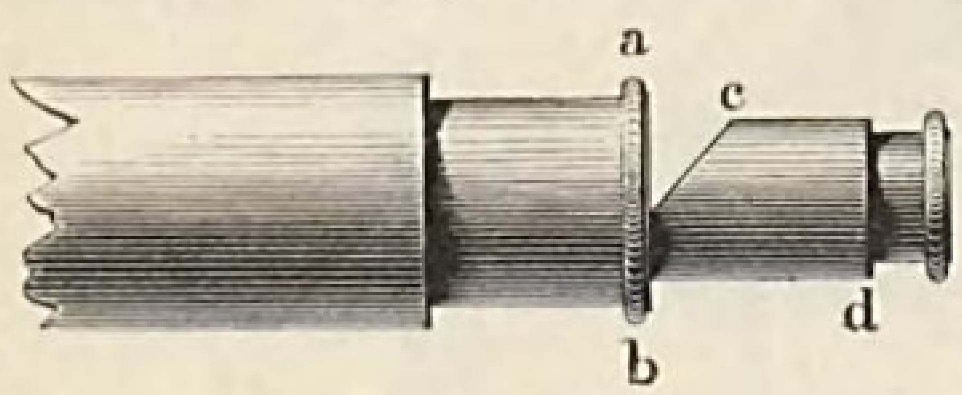
Dieser Ring R, welcher, um den Träger des getheilten Kreises herum-

gelegt, um denselben sich frei drehen lässt, ist in Fig. 50 (a. v. S.) im Grundriss dargestellt. Durch Anziehen der Klemmschraube *S* wird der Ring *R* festgestellt und dadurch auch eine weitere Umdrehung der Scheibe *C* mit Allem, was daran befestigt ist, verhindert; eine feinere Einstellung geschieht dann mittelst der Stellschraube *T*.

Auf die Scheibe *C* wird nun, nachdem man dieselbe mit Hülfe einer Wasserwage und der drei Stellschrauben der Platte *A* horizontal gestellt hat, das Magnetgehäuse aufgeschraubt. Der Raum, in welchem das Magnetstäbchen selbst spielen kann, wird durch zwei an den Enden zugeschmolzene Glasröhrchen gebildet. Es wird von einem in der Messingröhre *F*, Fig. 48, herabhängenden Seidenfaden getragen. Der Spiegel befindet sich unterhalb des Magnets. Ihm gegenüber ist das Gehäuse, welches auch seitliche, mit Glasplatten geschlossene Oeffnungen hat, mit einer Platte von geschliffenem Spiegelglas geschlossen.

Wenn man die Schraube *C* sammt dem Magnetgehäuse um ihre verticale Axe so dreht, dass die horizontale Axe der beiden Glasröhren *a b* ungefähr in den magnetischen Meridian zu stehen kommt, so kann nun der Magnet frei spielen und sich in den magnetischen Meridian einstellen. Nehmen wir an, dass die Ebene des Spiegels genau rechtwinkelig steht auf der magnetischen Axe des Magnetstabes, so wird eine auf der Ebene des Spiegels normale Linie die Richtung des magnetischen Meridians angeben. Dies vorausgesetzt, wird nun der Apparat so eingestellt, dass die Normale der Spiegelebene mit der Axe des Fernrohres zusammenfällt, dessen eigenthümliche Einrichtung aus Fig. 51 deutlicher zu ersehen ist.

Fig. 51.



Das Objectiv des Fernrohres ist dem Spiegel zugewendet. Da, wo das vom Objectiv entworfene Bild entsteht, bei *ab*, Fig. 51, ist das Rohr durch eine Glasplatte verschlossen, auf welcher eine senkrechte und eine wagerechte feine Linie eingeritzt sind, welche die Stelle des Fadenkreuzes vertreten. Das Ocular steckt in der Hülse *c d*, welche von oben her zur Hälfte eingeschnitten ist, so dass man in diesen Einschnitt eine Platte von unbelegtem Spiegelglas legen kann. Dieser kleine Spiegel dient zur Erleuchtung des Fadenkreuzes. Ist der Apparat nahezu in die richtige Lage gebracht, so erblickt man, durch das Ocular schauend, den verticalen Strich einmal direct und dann noch sein Bild im Spiegel des Magnets. Mit Hülfe der Stellschraube *T*, Fig. 50, kann man es aber nun leicht dahin bringen, dass die beiden Bilder des verticalen Striches zusammenfallen, und wenn dies der Fall ist, so steht in der That die Axe des Fernrohres normal auf der Spiegelebene, sie steht also im magnetischen Meridian. Das beschriebene Ocular wird von seinem Erfinder das Gauss'sche Ocular genannt.

Ist auf diese Weise die Axe des Fernrohres in die Ebene des magnetischen Meridians eingestellt, so wird der Nonius abgelesen, dann das

Magnetgehäuse vom Theodolit abgehoben und die Scheibe *C* sammt dem Fernrohre um die verticale Axe gedreht, bis die Visirlinie des Fernrohres in dem astronomischen Meridian steht, bis es also auf ein für den Beobachtungsort bestimmtes Meridianzeichen gerichtet ist, und nun abermals der Nonius abgelesen. Der Unterschied dieser beiden Ablesungen ergiebt dann die gesuchte Declination.

Wenn, wie es wohl meistens der Fall ist, für den Ort, wo der magnetische Theodolit aufgestellt wurde, gerade kein Meridianzeichen vorhanden ist, so richtet man das Fernrohr auf irgend einen entfernten Punkt, dessen Azimut für den Beobachtungsort entweder schon bekannt ist, oder aus genauen Karten ermittelt werden kann, und bestimmt also den Winkel, welchen der magnetische Meridian mit der nach dem fraglichen Orte gerichteten Visirlinie macht.

So fand z. B. Lamont, als er am 7. October 1852 auf dem Schlossberge bei Freiburg seinen Theodolit aufgestellt hatte und die Visirlinie des Fernrohres rechtwinkelig auf der Ebene des Magnetspiegels stand, dass der Nonius auf 308^0 22,6′ zeigte. Nach Abnahme des Magnetgehäuses wurde das Fernrohr auf die Spitze des Kirchthurms von Langendenzlingen (ungefähr zwei Stunden nördlich von Freiburg) gerichtet, und nun zeigte der Nonius auf 278^0 14,3′; der Unterschied der beiden Ablesungen beträgt also 30^0 8,3′.

Den Generalstabskarten zufolge liegt die Visirlinie von dem Beobachtungspunkte auf dem Schlossberge nach dem Kirchthurme von Denzlingen noch 12^0 43′ östlich vom astronomischen Meridian; diese 12^0 43′ sind nun noch von 30^0 8,3′ abzuziehen, und so bleibt also für die Declination der Werth 17^0 25,3′.

Dies wäre der wahre Werth der Declination, wenn die Ebene des Spiegels absolut rechtwinkelig auf der magnetischen Axe des Magnets stände, was mit voller Genauigkeit nie erreichbar ist. Der magnetische Reisetheodolit ist nicht so eingerichtet, dass man den Magnet umlegen und alsdann mittelst einer zweiten Messung den Collimationsfehler eliminiren kann; dagegen ist die Grösse dieses Fehlers durch genaue Messung in einem magnetischen Observatorium, für welches die Lage des magnetischen Meridians bereits ermittelt ist, ein- für allemal bestimmt. Für das fragliche Instrument, mit welchem Lamont die obigen Messungen ausführte, beträgt er + 14,5′, und diese sind noch zu 17^0 25,3′ zu addiren, um den wahren Werth der Declination für Freiburg zu finden, welcher demnach 17^0 39,8′ ist.

Variationen und Störungen der Declination und Inclination. Es ist bereits früher bemerkt worden, dass die Lage des magnetischen Meridians fortwährenden Schwankungen unterworfen ist. Diese Schwankungen sind bald zufällig und plötzlich, bald regelmässig und periodisch. Die ersteren nennt man Störungen, die letzteren Variationen. Bezüglich der Variationen beobachtet man in unseren Gegenden folgenden 20

Gang. Während der Nacht ist die Nadel fast stationär, mit Sonnenaufgang aber fängt das Nordende der Nadel an, sich nach Westen zu bewegen. Gegen 5 Uhr Nachmittags erreicht die westliche Ablenkung ihr Maximum, die Nadel geht dann bis 9, 10 oder 11 Uhr Abends nach Osten zurück.

Die Amplitude der täglichen Variationen, d. h. der Winkel zwischen dem östlichsten und westlichsten Stande der Nadel, ist veränderlich; sie ist in den Sommermonaten am grössten. Ihr Mittelwerth beträgt in Deutschland vom April bis zum September 13 bis 15 Minuten, vom October bis zum März nur 8 bis 10 Minuten. An manchen Tagen beträgt die Amplitude 25′, an anderen dagegen nur 5′ bis 6′.

In nördlichen Gegenden sind im Allgemeinen die täglichen Variationen bedeutender und weniger regelmässig. Je mehr man sich dagegen dem magnetischen Aequator nähert, desto mehr nimmt die Grösse der täglichen Variation ab, und auf dem magnetischen Aequator selbst ist sie ganz unmerklich.

Südlich vom magnetischen Aequator finden die täglichen Variationen in entgegengesetzter Richtung statt, d. h. hier bewegt sich das Südende der Nadel nach Westen, während nördlich vom magnetischen Aequator das Nordende sich nach dieser Richtung bewegt; und wenn auf der nördlichen Hemisphäre das Nordende der Nadel sich nach Osten bewegt, so hat auf der südlichen Halbkugel das Südende der Nadel eine östliche Bewegung.

Die Beobachtung der täglichen Variationen erfordert sehr genaue Instrumente. Alle früher angewandten werden in dieser Hinsicht von dem schon oben beschriebenen Gauss'schen Magnetometer übertroffen, welches die geringsten Veränderungen in der Lage der Magnetnadel angiebt.

Auch die Inclination ist solchen täglichen Variationen unterworfen, wie dies zuerst Graham im Jahre 1772 beobachtet hat, jedoch ist die Amplitude dieser Variationen geringer als bei der Declination, und sie lassen sich überhaupt bei weitem nicht mit der Genauigkeit beobachten, wie die Variationen der Declination.

Abgesehen von diesen täglichen Variationen ist aber auch der Mittelwerth der Declination allmäligen sehr bedeutenden Veränderungen unterworfen. So war z. B. die Declination für Paris

im Jahre 1580	. . .	11° 30′	östlich
„ „ 1663	. . .	0 0	„
„ „ 1780	. . .	19 55	westlich
„ „ 1814	. . .	22 34	„
„ „ 1874	. . .	17 30	„

Seit 1814 hat die westliche Declination zu Paris fortwährend abgenommen und jetzt beträgt sie nur noch gegen 16°.

Solche an längere Perioden gebundene Veränderungen der Declination nennt man zum Unterschiede von den täglichen seculare Variationen.

Die Inclination ist ebenso wie die Declination täglichen und secularen Variationen unterworfen. Für Paris betrug die Inclination im Jahre 1671 noch 75°; seitdem hat sie fortwährend abgenommen und beträgt daselbst gegenwärtig nur noch ungefähr 65° 40′.

Wenn auch die früheren Bestimmungen nicht sehr genau sind, so ist doch eine fortwährende Abnahme der Inclination bewiesen.

Wir wenden uns nun zu den magnetischen Störungen. Es giebt verschiedene Einflüsse, welche plötzlich die Regelmässigkeit der täglichen Variationen stören, indem sie die Magnetnadel in unregelmässige Schwankungen versetzen, deren Amplitude oft mehr als einen Grad beträgt. Unter allen diesen Einflüssen wirkt das Nordlicht am stärksten. Wenn dieses Meteor am Himmel erscheint, ist die Magnetnadel in beständiger Bewegung und erleidet eine bedeutende Ablenkung. Die Nadel ist aber nicht allein an den Orten bewegt, wo gerade das Nordlicht sichtbar ist, sondern auch noch an weit entfernten Orten, wo man keine Spur des Nordlichtes am Himmel sieht. Im Allgemeinen jedoch sind die Schwankungen um so stärker, je näher man dem Phänomen ist und je intensiver es erscheint.

Erdbeben und vulcanische Eruptionen scheinen auch auf die Nadel einzuwirken, und manchmal haben sie eine permanente Veränderung ihrer Lage zur Folge. So sah D. Bernouilli im Jahre 1767, dass während eines Erdbebens die Inclination um $^1/_2$ Grad abnahm, und bei einem Ausbruch des Vesuvs bemerkte Pater de la Torre, dass sich die Declination bedeutend änderte.

Intensität des Erdmagnetismus. Einer der wichtigsten 21
Punkte für die Theorie des Erdmagnetismus ist die Bestimmung seiner Intensität an verschiedenen Orten der Erde und zu verschiedenen Zeiten. Erst in neuerer Zeit sind darüber genaue Untersuchungen angestellt worden. Borda gab zuerst eine genaue Methode an, um die Intensitäten des Erdmagnetismus verschiedener Orte mit einander zu vergleichen, und Humboldt wandte diese Methode auf seiner Reise nach Amerika, sowie auf einer anderen Reise durch Frankreich, Italien und Deutschland an. Gauss endlich gab eine Methode an, die Intensität der magnetischen Erdkraft auf ein absolutes Maass zurückzuführen.

Borda's Methode besteht darin, die Oscillationsdauer einer und derselben Nadel an verschiedenen Orten zu beobachten, und aus der Veränderung der Schwingungsdauer auf die Aenderung der Intensität des Erdmagnetismus zu schliessen. Eine Magnetnadel, eine Declinationsnadel sowohl wie eine Inclinationsnadel, aus ihrer Gleichgewichtslage etwas entfernt, und dann sich selbst überlassen, oscillirt wie ein Pendel, und in der That sind auch diese Oscillationen ganz den Gesetzen unterworfen, welche wir früher für das gewöhnliche Pendel kennen gelernt haben; nur ist hier der Magnetismus, dort die Schwere die Ursache der Schwingungen. Wir haben dort gesehen, dass sich die Schwingungs-

zeiten umgekehrt wie die Quadratwurzeln aus den beschleunigenden Kräften verhalten, dass also die beschleunigenden Kräfte den Quadraten der Schwingungszahlen direct proportional sind. Wenn also eine und dieselbe Nadel etwa an einem Orte doppelt so schnell oscillirte als am anderen, so wäre also hier die magnetische Kraft 4 mal so gross als dort.

Es sei M die magnetische Kraft, welche an einem Orte die Schwingungen der Nadel erzeugt, und N die Anzahl der Oscillationen, welche sie in einer gegebenen Zeit, etwa in 5 Minuten, macht; ferner sei m die beschleunigende Kraft, welche an einem zweiten Orte auf dieselbe Nadel wirkt, und n die Zahl der Oscillationen, welche sie in derselben Zeit, also auch in 5 Minuten, macht, so hat man

$$\frac{M}{m} = \frac{N^2}{n^2}.$$

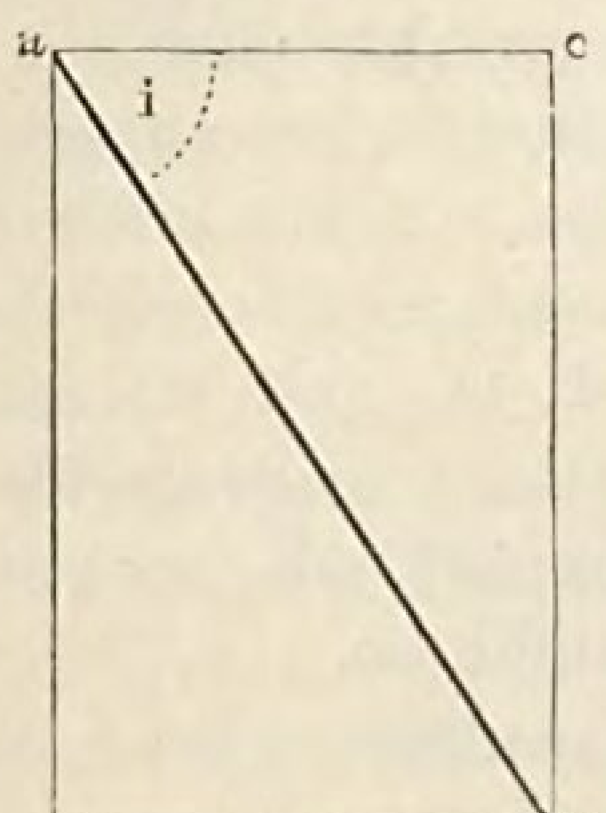
Hätte man z. B. am ersten Orte $N = 25$, am zweiten $n = 24$ gefunden, so hätte man

$$\frac{M}{m} = \frac{625}{576} = 1{,}085,$$

das heisst, wenn man die magnetische Kraft, welche am zweiten Orte auf die Nadel wirkt, zur Einheit nimmt, so ist diese Kraft am ersten Orte 1,085.

Wenn man nun annehmen kann, dass sich der magnetische Zustand der Nadel von einem Versuch zum anderen nicht geändert habe, so findet man auf diese Weise das Verhältniss der erdmagnetischen Kraft für zwei verschiedene Orte der Erde.

Fig. 52.



Um die Intensitäten der ganzen magnetischen Erdkraft für verschiedene Orte direct mit einander zu vergleichen, müsste man zu diesen Oscillationsversuchen natürlich Inclinationsnadeln anwenden. Weil aber Versuche mit diesen immer weniger genaue Resultate geben, so zieht man vor, Oscillationsversuche mit der Declinationsnadel zu machen, die Inclination zu messen und aus diesen Daten die totale Intensität zu berechnen.

Die Kraft, welche die Declinationsnadel oscilliren macht, ist nur ein Theil der ganzen magnetischen Erdkraft, und zwar ist dieser Antheil um so kleiner, je grösser die Inclination ist.

Wenn mit M die in der Richtung der Inclinationsnadel wirkende ganze magnetische Erdkraft ab, Fig. 52, und mit i die Inclination bezeichnet wird, so ist $M . \cos i$ die horizontale Componente ac derselben, also die Kraft, welche die Declinationsnadel oscilliren macht. Bezeichnet

aber m die horizontale Componente der magnetischen Erdkraft, so ist $\frac{m}{\cos i}$ die totale.

Wenn man die Resultate der Intensitätsbestimmungen zusammenstellt, welche an verschiedenen Orten der Erdoberfläche gemacht worden sind, so ergiebt sich das allgemeine Resultat, dass die totale Intensität in der Nähe des magnetischen Aequators am kleinsten ist und dass sie um so mehr wächst, je mehr man sich von demselben nach Norden oder Süden entfernt. In der Nähe der magnetischen Pole ist sie ungefähr 1,5 mal so gross, als am Aequator. An einem und demselben Orte ist aber die Intensität auch veränderlich und wie die Declination und Inclination täglichen und secularen Variationen unterworfen.

Die Schwingungsmethode giebt nur die Verhältnisszahlen der erdmagnetischen Kraft, ohne sie auf ein absolutes Maass zurückzuführen. Ausserdem hat diese Methode noch den Nachtheil, dass man nicht immer sicher sein kann, ob der magnetische Zustand der Nadel selbst sich nicht geändert habe, und man also Gefahr läuft, Veränderungen in diesem Zustande den Veränderungen der erdmagnetischen Kraft zuzurechnen. Von allen diesen Mängeln ist die Gauss'sche Methode der Intensitätsbestimmung frei; wir werden weiter unten die Grundsätze derselben in ihren Hauptpunkten aus einander setzen.

Einfluss des Erdmagnetismus auf das Eisen. Wenn man eine Stange von weichem Eisen in die Richtung der Inclinationsnadel hält, so wird sie durch den Einfluss des Erdmagnetismus selbst magnetisch, und zwar wird ihr oberes Ende ein Südpol, ihr unteres ein Nordpol, wie man leicht sehen kann, wenn man eine kleine empfindliche Magnetnadel bald dem oberen, bald dem unteren Ende der Stange nähert. Derselbe Pol der Nadel wird von dem einen Ende des Stabes angezogen, von dem anderen abgestossen. Kehrt man den Stab um, so sind sogleich auch seine Pole umgekehrt, das obere Ende ist wieder ein Südpol, das untere wieder ein Nordpol. 22

Dieselbe Wirkung, nur etwas schwächer, bringt auch der Erdmagnetismus auf eine vertical hängende Eisenstange hervor, überhaupt auf jede Eisenstange, welche nicht einen rechten Winkel mit der Richtung der Inclinationsnadel macht, nur ist die Wirkung um so geringer, je mehr sie sich von der Richtung der Inclinationsnadel entfernt.

Ist I die Intensität des Magnetismus, welche ein Stab annimmt, wenn er in der Richtung der Inclinationsnadel gehalten wird, so wird $I \cos \alpha$ die Intensität seines Magnetismus sein, wenn er einen Winkel α mit der Richtung der Inclinationsnadel macht.

In gleicher Weise wie auf einen Eisenstab wirkt der Erdmagnetismus inducirend überhaupt auf jede Eisenmasse.

Eisenstäbe, welche Jahre lang in unveränderter Weise dem magnetisch vertheilenden Einfluss der Erde ausgesetzt blieben, zeigen oft permanenten Magnetismus.

Stahlstäbe, welche der vertheilenden Wirkung des Erdmagnetismus ausgesetzt sind, werden durch einige Hammerschläge in permanente Magnete verwandelt, und daher kommt es, dass fast alle Werkzeuge einer Schlosserwerkstätte mehr oder minder magnetisch sind. Es scheint, dass durch den Stoss die Coërcitivkraft überwunden wird, vermöge deren der Stahl der Magnetisirung durch den Erdmagnetismus widersteht.

23 **Bestimmung der Inclination.** Die Inclination lässt sich nicht so leicht direct mit Genauigkeit bestimmen als die Declination, weil es ungemein schwierig ist, zuverlässige Inclinatorien zu construiren, weshalb denn auch diese Instrumente sehr kostspielig und für öfteren Transport wenig geeignet sind. Man hat deshalb auf mannigfache Weise versucht, die Inclination auf indirectem Wege zu bestimmen. Brugmann sprach zuerst die Idee aus, den durch den Erdmagnetismus im weichen Eisen inducirten Magnetismus zur Inclinationsbestimmung anzuwenden.

Nach Lloyd's Versuchen ist die magnetisch inducirende Kraft, mit welcher der Erdmagnetismus auf einen Eisenstab wirkt, oder, mit anderen Worten, das magnetische Moment, welches durch den Erdmagnetismus in einem Eisenstab hervorgerufen wird, dem Cosinus des Winkels proportional, welchen der Stab mit der Richtung der Inclinationsnadel macht.

Darauf hat nun Lloyd ein sehr sinnreiches Verfahren zur Bestimmung der Inclination mittelst einer horizontalen Magnetnadel gegründet. Oestlich oder westlich von einer, an einem Coconfaden hängenden, 8 cm langen horizontalen Magnetnadel ist ein runder Eisenstab von 30 cm Länge und 2 cm Durchmesser angebracht. Er lässt sich um eine senkrecht zu seiner Länge und rechtwinkelig auf dem magnetischen Meridian stehende Axe drehen, welche die Länge der Magnetnadel halbirt. Das eine Ende des Eisenstabes stösst gerade an diese Umdrehungsaxe an, so dass es beständig in der Horizontalebene der Nadel bleibt. Dieser Stab wird nun einmal vertical gestellt und dann durch eine Drehung um 90^0 in eine horizontale Lage gebracht. In beiden Lagen lenkt er die Nadel aus ihrer Gleichgewichtslage ab, und wenn man diese Ablenkungen genau beobachtet hat, so kann man daraus die Stärke der magnetischen Induction bei horizontaler und bei verticaler Stellung des Stabes und aus dem Verhältniss beider die Inclination ableiten.

Dasselbe Princip liegt in verbesserter Form dem Inclinometer Edelmann's*) zu Grunde.

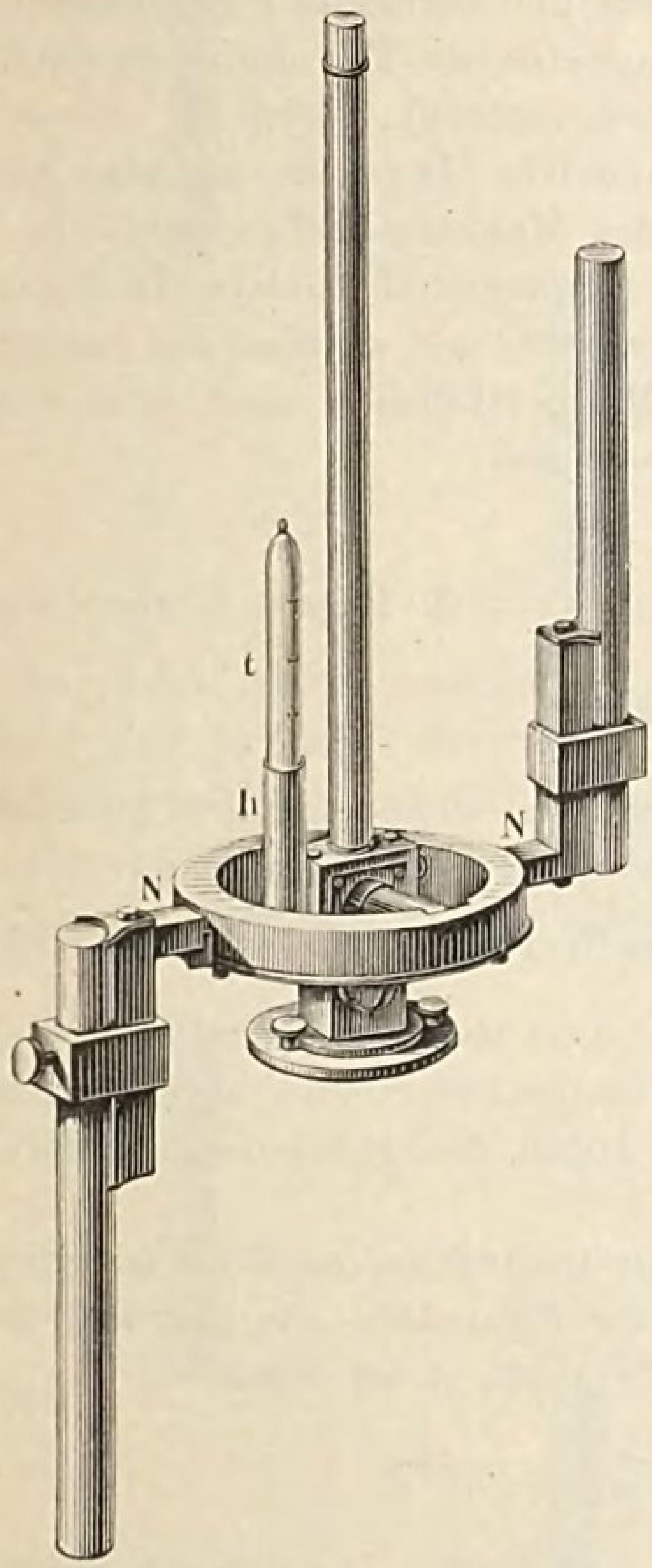
In anderer Weise hat Lamont die magnetische Induction im weichen Eisen benutzt, um an seinem magnetischen Reisetheodolit eine Vor-

*) Neue Apparate etc. I, S. 84.

richtung zur indirecten Bestimmung der magnetischen Inclination anzubringen.

In Fig. 53 ist das Magnetgehäuse sammt der Inclinationsvorrichtung dargestellt. Auf das Magnetgehäuse wird zunächst eine Messingplatte aufgesetzt, welche eine Hülse *h* zum Einstecken eines Thermometers *t* trägt. Auf diese Scheibe wird der massive Messingring *NN* aufgesetzt, welcher, oben und unten eben abgeschliffen, überall möglichst von gleicher Dicke ist; dieser Ring trägt seitlich zwei Arme, von denen der eine aufwärts, der andere abwärts gerichtet ist.

Fig. 53.



In diese zwei Arme werden zwei runde Stäbe von weichem Eisen eingesteckt und mittelst entsprechender Schrauben festgeklemmt.

Bevor man den Ring mit den Eisenstäben aufsetzt, wird das Instrument gerade so eingestellt, wie zu einer Declinationsbestimmung, d. h. so, dass, wenn man in das Fernrohr schaut, das durch den Magnetspiegel reflectirte Bild des verticalen Fadens mit dem direct gesehenen zusammenfällt. Nun wird der Ring mit den Eisenstäben auf das Magnetgehäuse gesetzt, und zwar so, dass die Verticalebene der beiden Stäbe, durch die Mitte des Magnetstäbchens gehend, auf dem magnetischen Meridian rechtwinkelig steht.

In der Höhe des Magnetstäbchens befindet sich nun auf der einen Seite ein Nordpol (das untere Ende des nach oben gekehrten Eisenstabes), auf der anderen ein Südpol (das obere Ende des nach unten gekehrten Eisenstabes), und diese beiden magnetischen Pole bewirken in gleichem Sinne eine Ablenkung des Magnetstäbchens aus dem magnetischen Meridian. Die Grösse dieser Ablenkung erfährt man, wenn man die Platte *C*, Fig. 49, sammt Allem, was darauf und daran befestigt ist, um ihre verticale Axe dreht, um dem abgelenkten Magnetstäbchen zu folgen, bis die Axe des Fernrohrs wieder rechtwinkelig steht auf der Ebene des Magnetspiegels, bis also die beiden Bilder des verticalen Fadens wieder zusammenfallen, wenn man in das Ocular des Fernrohrs hineinschaut.

Liest man jetzt den Nonius abermals ab, so giebt die Differenz dieser und der ersten Ablesung die Grösse des Winkels, um welchen die Magnetnadel durch den Einfluss des in den beiden Eisenstäben inducirten Magnetismus aus dem magnetischen Meridian abgelenkt worden ist. Wir wollen diesen Ablenkungswinkel mit v bezeichnen und zunächst sehen, in welchem Zusammenhange der Werth dieses Winkels v mit der Inclination i steht.

Es sei X die horizontale und Y die verticale Componente des Erdmagnetismus, so ist die Kraft, mit welcher der horizontale Erdmagnetismus das um den Winkel v aus dem magnetischen Meridian abgelenkte Magnetstäbchen in denselben zurückzuziehen strebt, gleich $X \,.\, sin\ v$.

Der in den beiden Eisenstäben inducirte Magnetismus, also auch das Drehungsmoment, welches sie auf das Magnetstäbchen ausüben, ist aber dem verticalen Erdmagnetismus proportional, dieses Drehungsmoment hält aber der Kraft das Gleichgewicht, mit welcher der horizontale Erdmagnetismus das abgelenkte Magnetstäbchen nach dem magnetischen Meridian zurückzieht, wir haben also

$$X \,.\, sin\ v = K\,Y.$$

Setzt man die Inclination gleich i, so ist $Y = X \,.\, tang\ i$, folglich auch

$$tang\ i = \frac{1}{K}\, sin\ v.$$

Man erhält also die Tangente der Inclination, wenn man den Sinus der durch die verticalen eisernen Stäbe bewirkten Ablenkung mit einem constanten Factor $\frac{1}{K}$ multiplicirt, dessen Werth für ein bestimmtes Paar von Eisenstäben dadurch ermittelt wird, dass man für denselben Ort an einem zuverlässigen Inclinatorium die Inclination i und an dem magnetischen Theodolit die entsprechende durch die verticalen Eisenstäbe bewirkte Ablenkung v abliest.

So fand Lamont im Jahre 1850 die Inclination zu München gleich $64^0\ 59{,}5'$ und die entsprechende durch die Eisenstäbe am magnetischen Theodolit bewirkte Ablenkung gleich $20^0\ 18{,}4'$, es ist demnach

$$\frac{1}{K} = \frac{tang\ 64^0\ 59{,}5'}{sin\ 20^0\ 18{,}4'} = 6{,}177.$$

Ist einmal dieser Factor für ein bestimmtes Instrument mit bestimmten Eisenstäben ermittelt, so reicht an einem anderen Orte nur die Beobachtung der Ablenkung v hin, um aus derselben die entsprechende Inclination zu berechnen. Im Jahre 1850 fand z. B. Lamont zu Aschaffenburg mit seinem Instrumente die fragliche Ablenkung gleich $22^0\ 1'$; für Aschaffenburg wäre demnach

$$tang\ i = 6{,}177 \,.\, sin\ (22^0\ 1')$$

und danach

$$i = 66^0\ 38{,}5'.$$

Es ist bisher nur von einer einmaligen Beobachtung der durch den inducirten Magnetismus der Eisenstäbe hervorgebrachten Ablenkung die Rede gewesen; da aber die Eisenstäbe nie absolut frei von permanentem Magnetismus sind, so ist es nothwendig, die Beobachtung in der Weise zu vervielfältigen, dass dadurch die vom permanenten Magnetismus

Fig. 54.

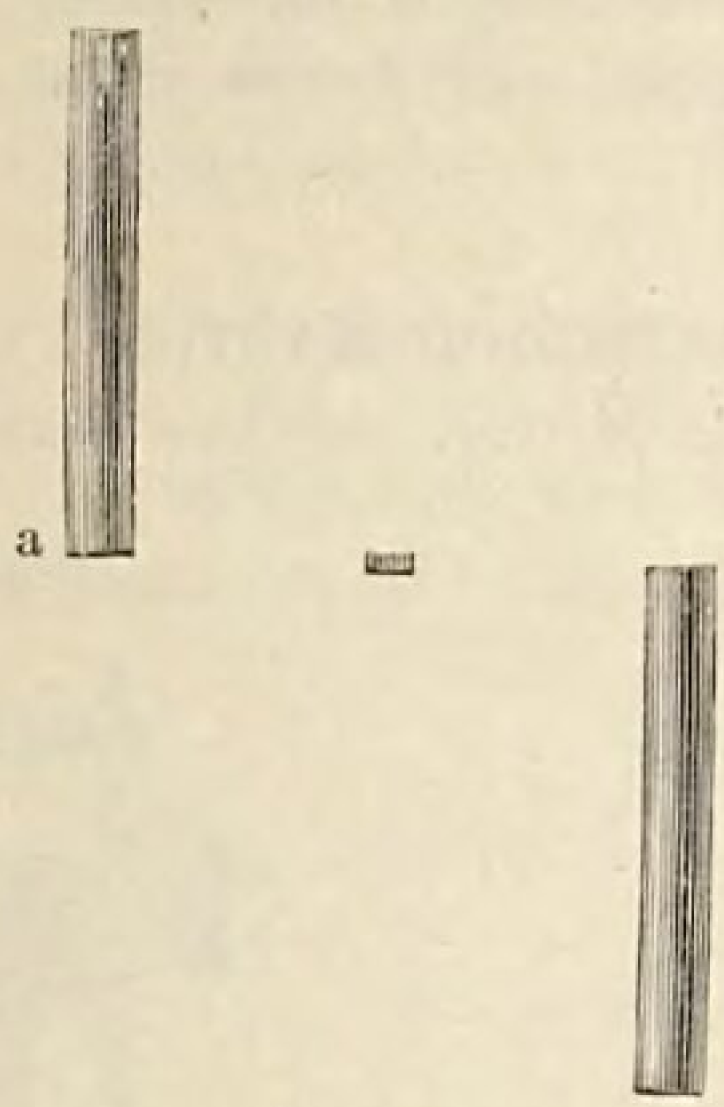
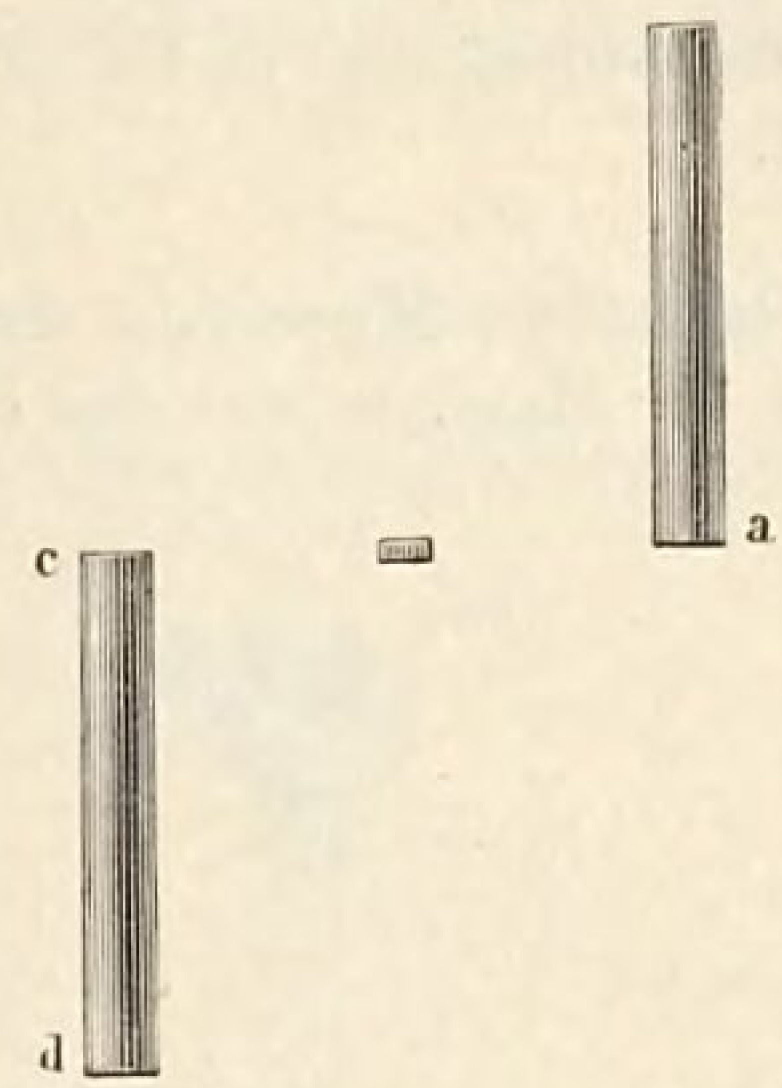


Fig. 55.



herrührenden, sowie sonstige Fehler möglichst eliminirt werden; es geschieht das dadurch, dass man in der Stellung der Eisenstäbe gegen das Magnetstäbchen so viel Variationen macht als möglich.

Es stelle Fig. 54 die erste Stellung dar, für welche man die Ablenkung beobachtet hat, so erhält man eine entsprechende Ablenkung nach

Fig. 56.

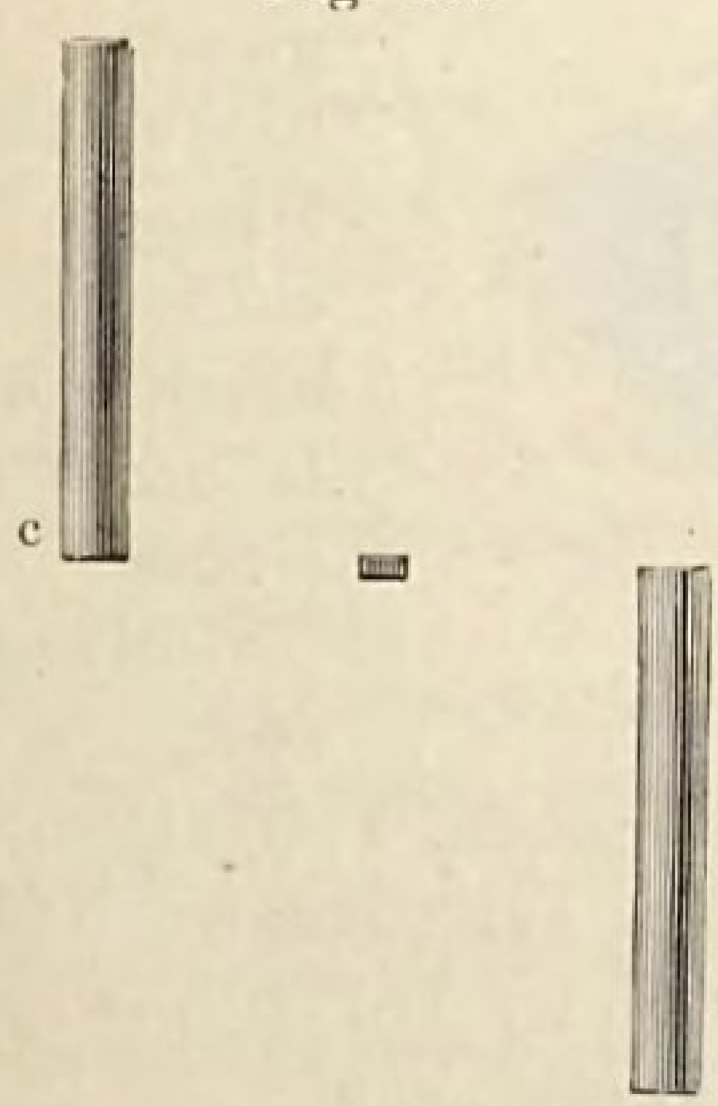
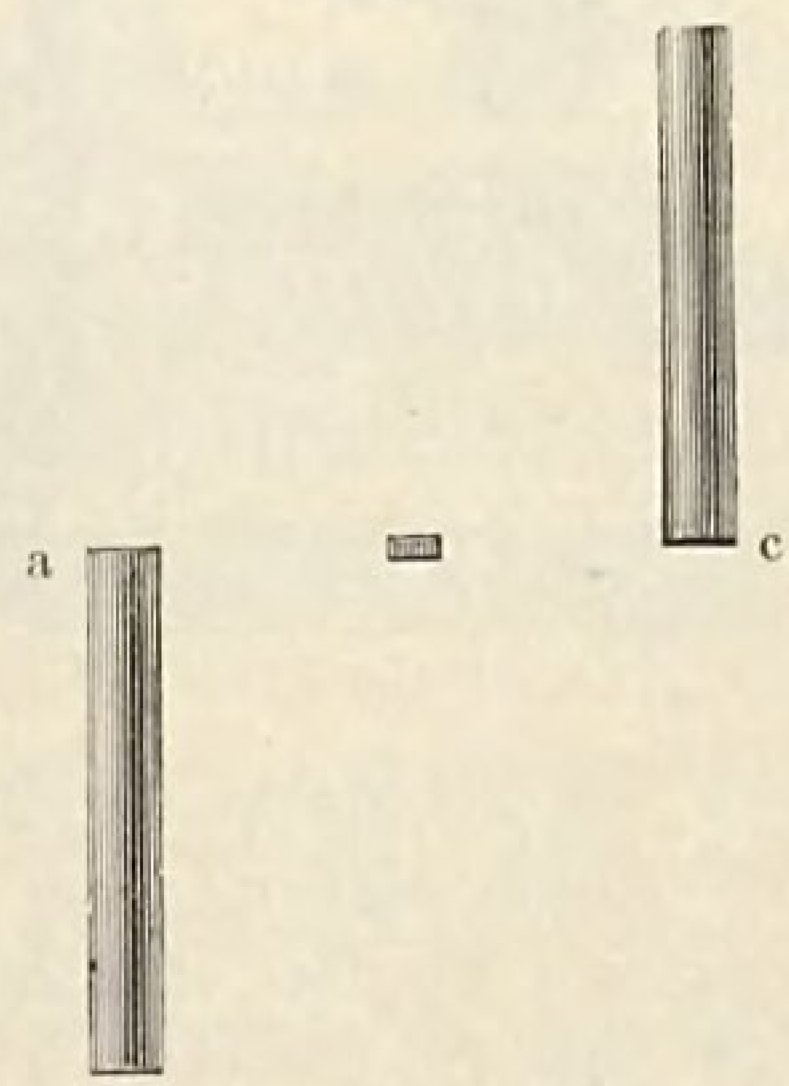


Fig. 57.



der entgegengesetzten Seite, wenn man den Ring in seiner Ebene um 180^0 dreht, so dass nun die Eisenstäbe in die Position Fig. 55 gegen die Magnetstäbchen kommen.

Kehrt man nun den Ring so um, dass die bisher untere Fläche die obere wird, so erhält man eine dritte Stellung der Eisenstäbe, Fig. 56,

und eine vierte, Fig. 57 (a. v. S.), endlich, wenn man den Ring wieder in seiner Ebene um 180° dreht.

Bei diesen vier Stellungen waren die Eisenstäbe stets in gleicher Weise eingeklemmt; nun aber kann man jeden in seinem Halter umkehren, so dass die Stabenden *b* und *d* in die Horizontalebene des Magnetstäbchens kommen. Nach dieser Veränderung wiederholt man die Beobachtung in den eben besprochenen vier Stellungen und erhält so für die gesuchte Ablenkung acht Beobachtungen, aus denen man das Mittel nimmt.

24 **Relative Messung der magnetischen Kräfte.** Die Tragkraft der Magnete war das einzige rohe Mittel, welches man zur Ver-

Fig. 58.

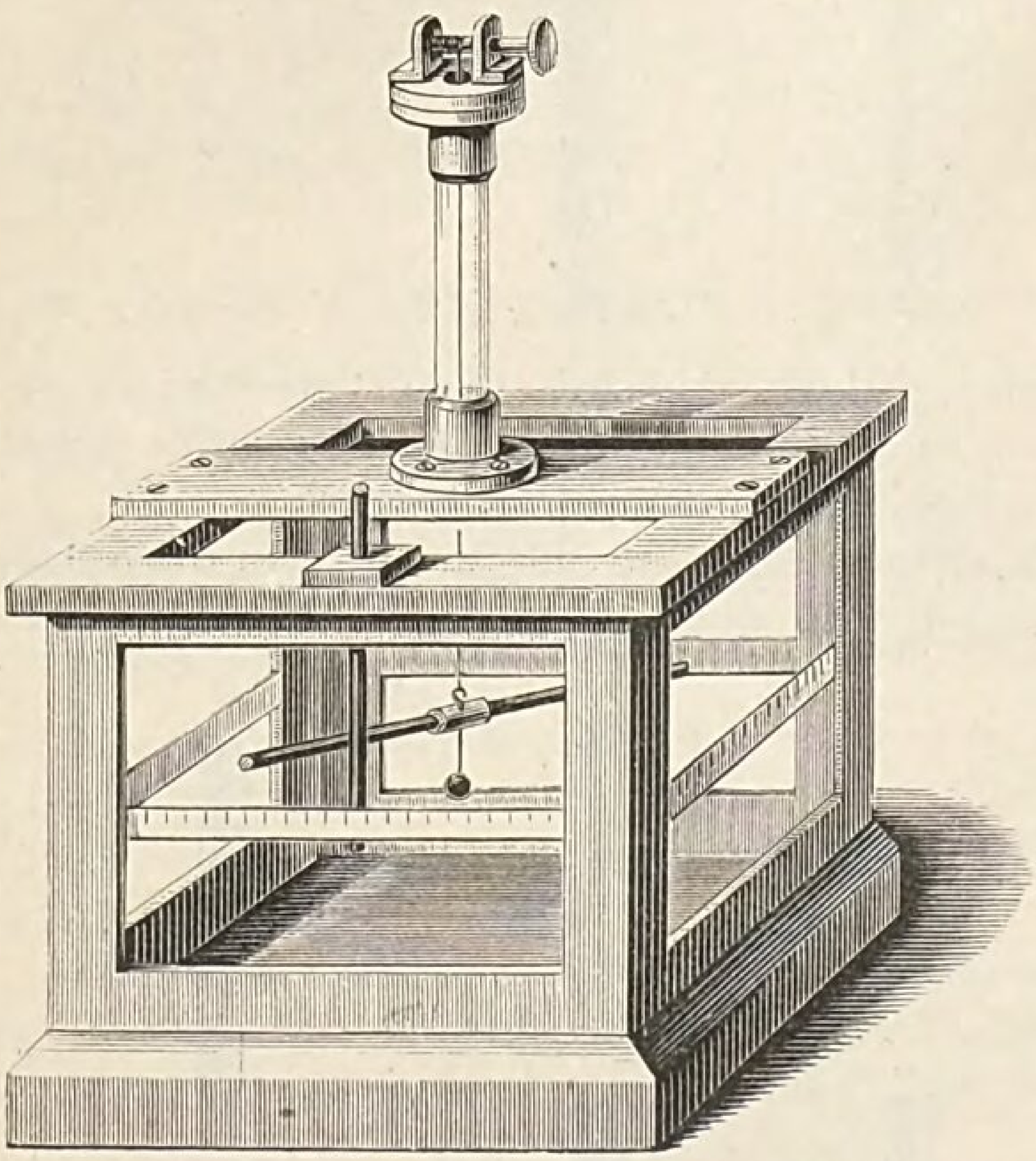
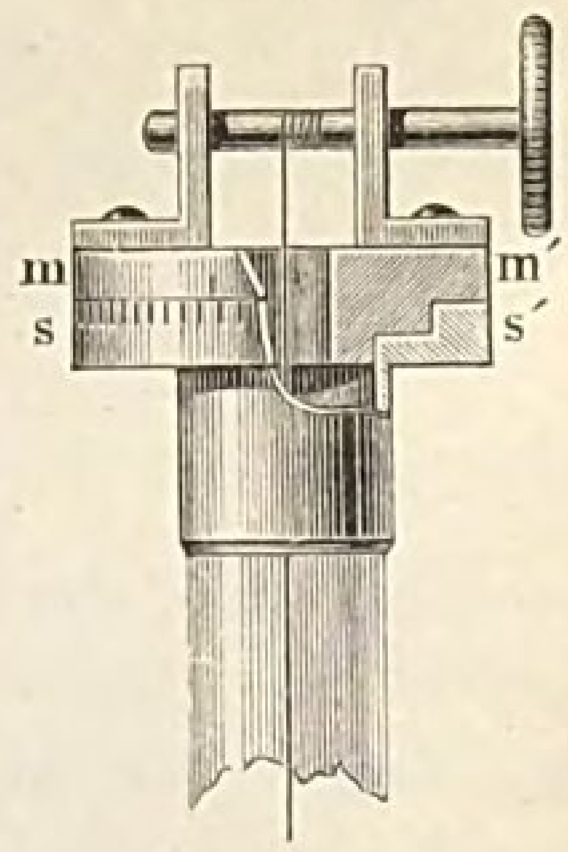


Fig. 59.



gleichung magnetischer Kräfte anwandte, bis Coulomb im Jahre 1780 genauere Methoden aufstellte und dadurch eine neue Bahn in der Wissenschaft eröffnete.

Coulomb wandte zwei verschiedene Mittel an, um die Stärke der Magnete zu messen. 1. Die Oscillationen einer an einem Seiden- oder Platinfaden aufgehängten Nadel; 2. die Drehung von Kupfer- oder Silberfäden in der Torsionswage, welche man nach ihm die Coulomb'sche Drehwage nennt.

I. Methode der Oscillationen. Wir haben schon im §. 21 gehört, dass die beschleunigende Kraft, unter deren Einfluss eine Magnetnadel oder ein Magnetstab um seine Gleichgewichtslage oscillirt, dem Quadrat der Schwingungszahl proportional ist. Nun aber ist diese beschleunigende Kraft eine Function des Erdmagnetismus und des Stabmagnetismus, man kann demnach aus der Schwingungsdauer auf die

Variationen des Erdmagnetismus schliessen, wie es im §. 21 geschehen ist, wenn der Stabmagnetismus ungeändert bleibt; auf die Variationen des Stabmagnetismus aber bei constanter Intensität des Erdmagnetismus.

Es sei n die Anzahl der Schwingungen, welche ein Magnetstab, dessen magnetische Intensität wir mit f bezeichnen wollen, in einer Minute unter dem Einflusse des Erdmagnetismus macht, während n' und f' die entsprechenden Grössen für einen im Uebrigen ganz gleichen, nur stärker magnetisirten Stab (bei gleichbleibender Stärke des Erdmagnetismus) bezeichnen, so hat man also

$$\frac{f}{f'} = \frac{n^2}{n'^2}.$$

Hätte z. B. der erste Stab vier, der zweite aber sechs Schwingungen in der Minute gemacht, so hätte man

$$\frac{f}{f'} = \frac{16}{36},$$

also

$$f' = f \cdot \frac{36}{16}.$$

II. Die Drehwage. Wenn ein Metallfaden durch ein angehängtes Gewicht in verticaler Richtung gespannt ist, so nimmt er eine bestimmte Gleichgewichtslage an. Wenn man den Draht durch Drehung aus dieser Gleichgewichtslage herausbringt, so erleidet er seiner ganzen Länge nach eine Torsion, eine Windung, in Folge deren er ein Bestreben hat, das Gewicht wieder in seine Gleichgewichtslage zurückzuführen.

Coulomb hat zuerst die Torsionskraft studirt und, wie wir schon oben (Band I, S. 343) gesehen haben, gefunden, dass die Kraft, mit welcher der Draht in die Gleichgewichtslage zurückzukehren strebt, der Grösse der Torsion proportional sei. Auf dieses Gesetz gründete er nun die Construction seiner Drehwage, mit Hülfe deren er die Gesetze der magnetischen und elektrischen Abstossung und Anziehung untersuchte.

Die Coulomb'sche Drehwage ist Fig. 58 dargestellt. Fig. 59 zeigt den oberen Theil in einem grösseren Maassstabe. Der verticale Cylinder, in welchem der Draht herabhängt, ist oben mit einer Messingfassung versehen, welche mit einem Ring ss' endet. Darauf passt eine in der Mitte durchbrochene Messingplatte mm', welche sich mit sanfter Reibung um die verticale Axe des Cylinders drehen lässt. Der Ring ss' ist an seinem äuseren Umfange in Grade getheilt, und die Scheibe mm' hat einen Index, mittelst dessen man die Grösse der vorgenommenen Drehungen ablesen kann. Dieser Theil heisst Torsionskopf.

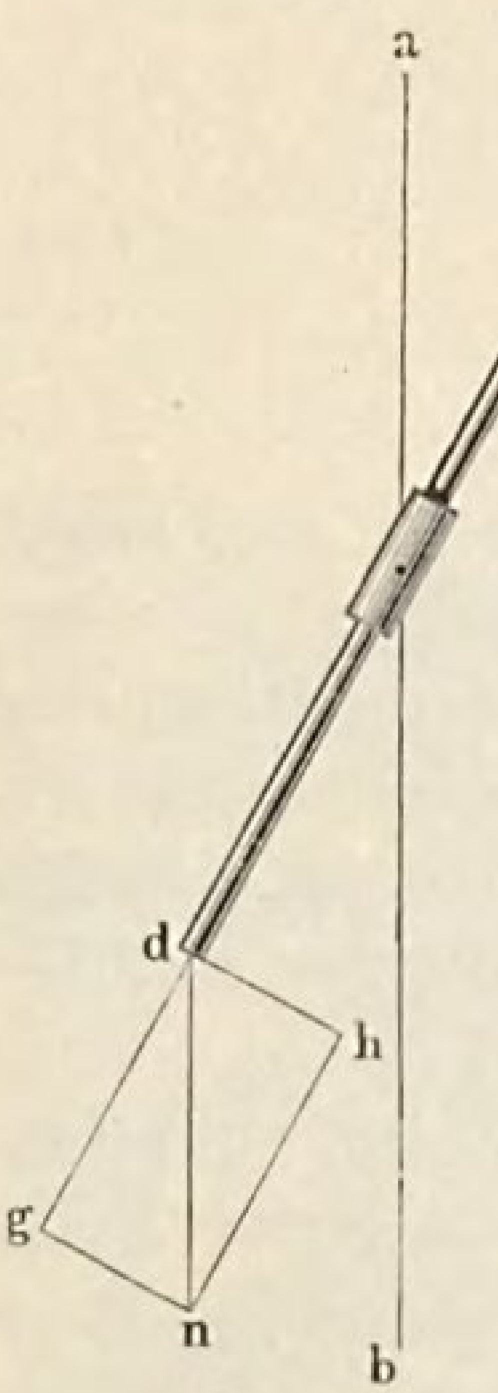
Am unteren Ende des Fadens hängt eine Art Bügel von Messing oder eine Hülse, in welche man die Magnetstäbe hineinlegt. Am Um-

fange des Kastens ist ein Papierstreifen aufgeklebt, welcher mit einer Theilung versehen ist. Der Draht muss genau im Mittelpunkte dieser Theilung hängen.

Wenn das Instrument gehörig justirt ist, bestimmt man die Gleichgewichtslage des Fadens, indem man einen nicht magnetischen Stab in die Hülse steckt und den Kopf des Apparates so lange dreht, bis der Stab genau in dem magnetischen Meridian liegt; wenn man nun einen magnetisirten Stab in den Bügel legt, so wird er durch zwei Kräfte in dieser Lage zurückgehalten, durch die richtende Kraft des Erdmagnetismus und durch den Faden, welcher bei dieser Lage ohne Torsion ist.

Wenn nun der Kopf des Apparates aus dieser Lage herausgedreht wird, so würde auch der Stab dieser Drehung folgen, wenn er nicht magnetisch wäre. Der Draht strebt den Stab in diejenige Lage zu bringen, bei welcher er ohne Torsion sein würde, der Erdmagnetismus aber zieht ihn in den magnetischen Meridian zurück; unter dem Einflusse dieser beiden Kräfte nun muss der Stab irgend eine Zwischenlage annehmen, welche von dem Verhältnisse der beiden Kräfte abhängt.

Fig. 60.



Das Mikrometer, d. h. die Platte mm', Fig. 59, sei um 180^0 gedreht und dadurch die Nadel um 20^0 vom magnetischen Meridian abgelenkt worden, so beträgt die Torsion des Fadens $180 - 20 = 160^0$. Wenn V die Drehung des Mikrometers, v die Ablenkung der Nadel ist, so ist die Torsion des Fadens $V - v$.

In Fig. 60 sei ab die Richtung des magnetischen Meridians, cd die Lage der aus dem magnetischen Meridian abgelenkten Nadel, so ist leicht zu ermitteln, mit welcher Kraft der Erdmagnetismus die Nadel in die Lage des magnetischen Meridians zurückzuführen strebt. Denken wir uns die ganze auf die Nadel wirkende magnetische Kraft in d applicirt. Die Richtung dieser Kraft ist die des magnetischen Meridians, wir können also die Kraft der Grösse und Richtung nach durch eine Linie dn darstellen. Diese Kraft lässt sich aber in zwei andere zerlegen, deren eine dg, in der Richtung der Nadel wirkend, keinen Effect hervorbringen kann, während die andere Componente dh, welche rechtwinkelig auf die Richtung der Nadel angreift, dieselbe zu drehen strebt.

Bezeichnet m die totale Kraft dn, so ist die Componente dh gleich $m . sin\ v$, und dieser Kraft muss die Torsionskraft des Fadens, welche die Nadel nach der anderen Seite zu drehen strebt, das Gleichgewicht halten.

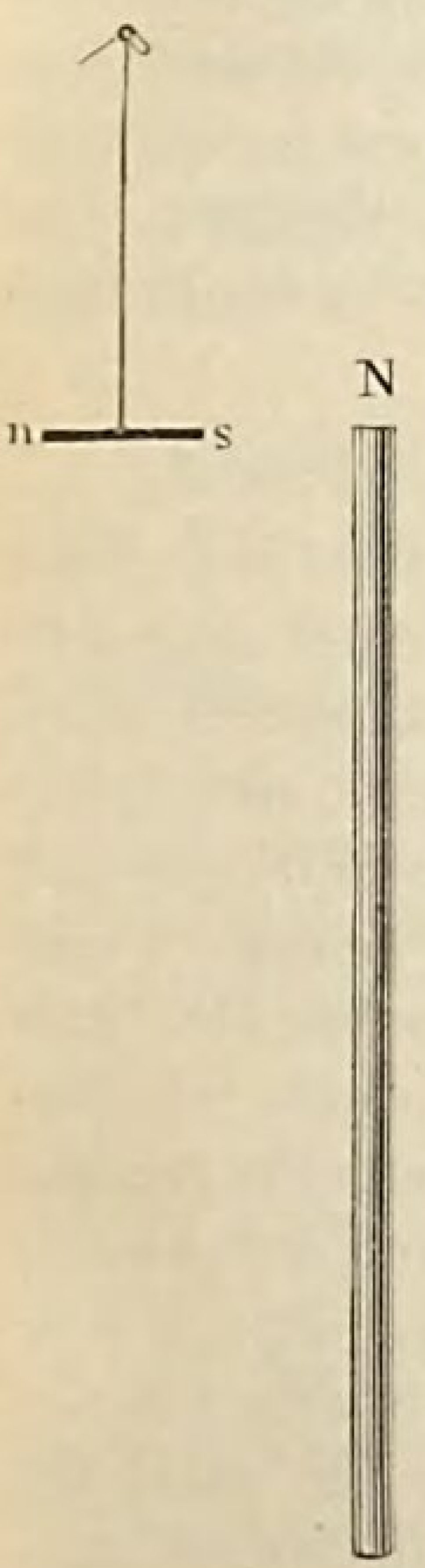
Wenn v klein, d. h. wenn es unter 20^0 ist, so kann man ohne merklichen Fehler den Bogen für den Sinus setzen.

Dividirt man den Torsionswinkel des Fadens $V - v$ durch den Ablenkungswinkel v, so erhält man einen Quotienten $\frac{V - v}{v}$, dessen Werth angiebt, wie viel Grade die Torsion des Fadens betragen müsse, um den Stab um 1^0 abzulenken. Für den vorhin betrachteten Fall ist $V - v = 160$ und $v = 20$, mithin jener Quotient $\frac{160}{20} = 8$, d. h. bei dem eben stattfindenden magnetischen Zustande des Stabes ist die Torsionskraft des Fadens für eine Drehung von 8^0 gerade hinreichend, um der Kraft das Gleichgewicht zu halten, mit welcher der Erdmagnetismus den Stab in den magnetischen Meridian zurückzuführen strebt, wenn er einen Winkel von 1^0 mit diesem Meridian macht.

Nehmen wir an, derselbe Stab, mit welchem der vorige Versuch angestellt worden war, sei stärker magnetisirt worden, man hätte das Mikrometer um 495^0 drehen müssen, da der Stab um 15^0 abgelenkt wird, so wäre die Torsion des Fadens $495 - 15 = 480^0$. Für diesen Fall ist die Torsion des Fadens, welche einer Ablenkung von 1^0 entspricht, $\frac{480}{15} = 32^0$. In dem letzteren Falle war also die magnetische Kraft des Stabes 4 mal so gross als im ersteren.

Gesetz der Kraftwirkung zweier Magnetpole auf einander. 25 Die Intensität, mit welcher zwei Magnetpole sich gegenseitig anziehen und abstossen, ist dem Quadrat ihrer Entfernung umgekehrt proportional. Dieses Fundamentalgesetz des Magnetismus war schon früher von einigen Physikern vermuthet worden, allein Coulomb hat die Richtigkeit desselben zuerst mit Hülfe der beiden oben angeführten Methoden nachgewiesen.

Fig. 61.



1. Durch Oscillationen. Eine kleine Magnetnadel wird an einem Coconfaden so aufgehängt, dass sie in horizontaler Ebene frei oscilliren kann, aber vor störenden Luftströmungen hinlänglich geschützt ist. Diese Nadel lässt man zuerst unter dem alleinigen Einflusse des Erdmagnetismus oscilliren. Es sei n die beobachtete Zahl der Schwingungen in einer Minute, f der horizontale Theil der magnetischen Erdkraft, welche auf sie wirkt.

Nun lässt man den einen Pol eines möglichst stark magnetisirten Stahlstabes auf die Nadel wirken. Dieser Stahlstab wird in den magnetischen Meridian der Nadel ns, Fig. 61, gebracht, und zwar in verticaler Stellung, so dass dem Pol s der Nadel derjenige Pol N des Stabes zugekehrt ist, auf welchen er anziehend wirkt.

Der Stab NS muss so gross sein, dass die Entfernung sN sehr klein ist im Vergleich zur Entfernung sS, dass man also die Wirkung des Pols S auf s ohne merklichen Fehler vernachlässigen kann.

Bezeichnen wir mit n' die Zahl der Schwingungen der Nadel für den Fall, dass der Pol N des Stabes NS aus einer bestimmten Entfernung auf die Nadel wirkt, und mit f' die Kraft, welche nun die oscillirende Nadel beschleunigt, so hat man im Vergleiche mit dem vorigen Versuche

$$\frac{f'}{f} = \frac{n'^2}{n^2}.$$

Hätte die Nadel unter dem alleinigen Einflusse des Erdmagnetismus 15 Schwingungen in einer Minute gemacht, hingegen 41, wenn der Pol N des Stabes sich 10 cm weit von der Mitte der Nadel befindet, so hätte man

$$\frac{f'}{f} = \frac{41^2}{15^2}.$$

Man bringt nun den Stab in die doppelte Entfernung, so dass N 20 cm weit von der Nadel ist und beobachtet abermals die Zahl der Oscillationen; gesetzt, man fände ihre Anzahl in einer Minute $n'' = 24$, so ist, wenn man mit f'' die in diesem Falle auf die Nadel wirkende Kraft bezeichnet,

$$\frac{f''}{f} = \frac{24^2}{15^2}.$$

Die Grösse f' ist offenbar die Summe der erdmagnetischen Kraft und der anziehenden Kraft, welche der Pol N aus einer Entfernung von 10 cm auf die Nadel ausübt; letztere ist also offenbar $f' - f$. Ebenso ist die anziehende Kraft, welche der Stab aus einer Entfernung von 20 cm auf die Nadel ausübt, $f'' - f$. Durch die Combination der beiden letzten Gleichungen ergiebt sich aber

$$\frac{f' - f}{f'' - f} = \frac{41^2 - 15^2}{24^2 - 15^2} = \frac{1456}{351} = 4{,}1.$$

Dieser Versuch zeigt also, dass die anziehende Kraft eines magnetischen Pols in doppelter Entfernung wirklich nahe viermal schwächer wird.

2. Mit der Drehwage. Auch für diese Versuche muss man lange magnetische Stahlstäbe oder Drähte anwenden, damit die Wirkung des einen Pols gegen die des anderen verschwindend werden könne. Coulomb's Stäbe waren 56 cm lang, hatten 1 bis 2 mm Durchmesser und waren möglichst stark magnetisch. Ein solcher Stab wurde in den Bügel der Drehwage Fig. 58 gebracht, also horizontal aufgehängt; ein vorläufig angestellter Versuch ergab, dass eine Torsion von 35° nöthig war, um den Magnetstab 1° aus dem Meridian abzulenken. Nun wurde ein zweiter Stab von oben in verticaler Richtung in den Kasten hineingesteckt und zwar so, dass der nach unten gekehrte Pol den zunächst liegenden des horizontalen Stabes abstiess. Der horizontale Magnetstab

kam in einer Lage zur Ruhe, welche einen Winkel von 24° mit dem magnetischen Meridian machte.

Bei dieser Lage des hängenden Stabes sind es zwei Kräfte, welche ihn in den magnetischen Meridian zurückzuführen streben, die Erdkraft und eine Torsion des Fadens von 24°. Da aber für jeden Grad Ablenkung die Kraft, welche den Stab in den Meridian zurückzuführen strebt, einer Torsionskraft von 35° gleich ist, so ist die Componente der Erdkraft, welche bei einer Ablenkung von 24° die Nadel zurückzuführen strebt, einer Torsionskraft 24 . 35 oder 840° gleich, wozu noch die 24°, d. h. die Torsion, welche der Faden wirklich hat, addirt werden müssen. Die Totalkraft ist also 864°.

Nun wurde das Mikrometer so gedreht, dass durch die Torsion des Fadens die horizontale Nadel dem Stabe näher kam. Die Drehung betrug 3 mal 360, also 1080°, und dadurch wurde die Nadel auf 17° dem magnetischen Meridian genähert. Dann wurde das Mikrometer noch um 5 mal 360° gedreht, so dass also jetzt die Totalumdrehung 2880° betrug. Dadurch wurde der horizontale Stab dem verticalen auf 12° genähert.

Für die zweite Stellung war das Aequivalent der Erdkraft eine Torsion von 17 × 35 = 595 Graden. Addirt man dazu die wirkliche Torsion des Fadens 1080 + 17 = 1097°, so erhält man eine Torsionskraft von 1692° als Maass für die abstossende Kraft, welche der untere Pol des eingeschobenen Magneten ausübt.

Auf dieselbe Weise findet man für die dritte Lage die abstossende Kraft gleich der Torsionskraft von 3312°.

Die Entfernungen der beiden einander abstossenden Pole verhalten sich also in diesen Versuchen wie 24 : 17 : 12, die entsprechenden abstossenden Kräfte aber wie 864 : 1692 : 3312, welch letztere Zahlen sich zu einander sehr nahe umgekehrt verhalten wie die Quadrate der ersteren.

Absolutes Maass der Polstärke, des Stabmagnetismus und der Intensität eines magnetischen Feldes. 26 Wirkt ein Pol von der Polstärke m_1 oder, was dasselbe sagen will, mit dem freien Magnetismus m_1 auf einen anderen Pol mit dem freien Magnetismus m_2, so ist die gegenseitige Kraftwirkung sowohl proportional der Grösse m_1 als auch der Grösse m_2, mithin proportional dem Producte $m_1\,m_2$. Da sie ausserdem, wie oben gezeigt wurde, verkehrt proportional dem Quadrate der Entfernung der Pole r ist, so kann man für diese Kraft f setzen:

$$f = \frac{m_1\,m_2}{r^2} \quad \dots\dots\dots\dots \quad 1)$$

Da für $m_1 = 1$, $m_2 = 1$, $r = 1$ auch $f = 1$ wird, so ist durch die Gleichung 1) auch das Maass des freien Magnetismus oder der Polstärke definirt. Jener Pol hat die Stärke Eins (oder den

freien Magnetismus Eins), welcher auf einen gleich starken Pol in der Entfernung Eins die Kraft Eins ausübt.

Im absoluten Maasssystem *) wird jene Kraft als gleich Eins definirt, welche der Masse Eins in der Zeit Eins die Geschwindigkeit Eins ertheilt.

Nach jenem absoluten Maasssystem, welchem das Centimeter, das Gramm und die Secunde zu Grunde gelegt wird — (c, g, s) System — enthält demnach jener Pol den freien Magnetismus Eins, welcher einem ihm gleichen, im Abstand von 1 cm befindlichen mit der Masse 1 behafteten die Beschleunigung 1 $\frac{\text{Centimeter}}{\text{Secunde}}$ ertheilt, oder was dasselbe sagt, welcher auf einen gleichen Pol in 1 cm Abstand die Kraft gleich 1 Dyne ausübt.

Sind m_1 und m_2 von gleichem Zeichen (d. h. beide nördlichen oder beide südlichen Magnetismus), so wird die Kraft f positiv. Da sie hierbei abstossend wirkt, so wird umgekehrt anziehende Kraft negativ bezeichnet. Dieselbe kommt zu Stande, wenn m_1 und m_2 entgegengesetzte Magnetismen sind.

Bei der oben gegebenen Definition werden Annahmen vorausgesetzt, welche nie ganz zu verwirklichen sind; einmal, dass es isolirte Pole gebe, dann, dass dieselben in 1 cm Abstand auf einander bewegend einwirken, ohne sich durch Influenz gegenseitig an Stärke zu verändern. Die letztere Schwierigkeit könnte man dadurch praktisch genügend umgehen, indem man den Magnetismus jenes Pols gleich Eins setzt, der einem ihm gleichen im Abstand r die Beschleunigung $\frac{1}{r^2}$ ertheilt. Man kann dann r so gross wählen, dass der Einfluss der gegenseitigen Influenz fast verschwindet.

Unter dem Stabmagnetismus oder dem magnetischen Moment eines Magnetstabes versteht man das Product aus dem freien Magnetismus m eines Pols desselben mit dem Abstand beider Pole l, also das Product ml. Wie wir hören werden, ist die Fernwirkung eines Magnetstabes proportional dieser Grösse ml.

Die Einheit des Stabmagnetismus oder des magnetischen Moments besitzt daher ein Magnetstab von 1 cm Polabstand und der Polstärke 1.

Unter einem magnetischen Felde versteht man den Raum in der Nähe eines Magneten, innerhalb welchem derselbe noch merklich auf einen Magnetpol (oder auf Eisen) einwirkt. Denkt man sich einen solchen isolirten Magnetpol von dem freien Magnetismus Eins, so erfährt derselbe an jedem Orte innerhalb des magnetischen Feldes eine Kraft von bestimmter Intensität. Diese Intensität wird als Intensität des magnetischen Feldes an dem betreffenden Orte bezeichnet und ebenfalls in absolutem Maasse gemessen.

*) Bd. I, S. 92.

Da die Erde selbst, wie wir im §. 22 erörtert haben, auf alle Eisenmassen magnetisirend einwirkt, so befinden sich alle Objecte der Erdoberfläche in dem magnetischen Felde des Erdmagnetismus.

Wenn man beispielsweise sagt, die Intensität dieses Feldes an irgend einem Orte sei gleich 0,5 absoluten Einheiten des (c, g, s) Systems, so heisst dies so viel als: Ein Magnetpol, welcher einen ihm gleichen im Abstande von r Centimetern mit der Kraft von $\frac{1}{r^2}$ Dynen abstösst, erhält durch den Erdmagnetismus eine bewegende Kraft von 0,5 Dynen. Um diese Kraft durch den Zug eines Gewichtsstückes hervorzubringen, müsste man dasselbe von der Masse $= \frac{0,5}{980,8} = 0,00051$ g, also etwas grösser als ein halbes Milligramm wählen.

Arbeit bei Annäherung oder Entfernung von Magnetpolen, Begriff des magnetischen Potentials. 27
Im Punkte m, Fig. 62, befinde sich ein Magnetpol von der Stärke m, im Abstande $mR = R$ hiervon befinde sich ein gleichnamiger Pol von der Stärke m'. Der letztere werde dem ersteren bis auf den Abstand $mr = r$ genähert. Wie gross ist nun die Arbeit, die man hierbei aufwenden muss, um längs des Weges Rr die steigende Abstossungskraft zu überwinden *)?

Fig. 62.



Um dies mit den Methoden der Elementarmathematik zu berechnen, denken wir uns die Strecke Rr in n kleine Abschnitte von der Grösse δ getheilt. Die Theilpunkte seien von r gegen R mit $r_1, r_2, r_3, \ldots. r_{n-1}$ bezeichnet.

Die abstossende Kraft hat in den Punkten:

$$r \quad r_1 \quad r_2 \quad \ldots. \quad r_{n-1} \quad R \quad \text{die Werthe:}$$

$$\frac{m m^1}{r^2} \quad \frac{m m^1}{r_1^2} \quad \frac{m m^1}{r_2^2} \quad \ldots. \quad \frac{m m^1}{r_{n-1}^2} \quad \frac{m m^1}{R^2}.$$

Der mittlere Werth der Kraft für die Strecke zwischen r und r_1 ist zwar nicht genau gleich dem arithmetischen Mittel

$$\frac{m m^1}{2}\left[\frac{1}{r^2} + \frac{1}{r_1^2}\right],$$

wird sich demselben aber um so mehr nähern, je kleiner man die Theilstrecken δ nimmt.

Es ist also dann diese mittlere Kraft:

*) Die folgende Berechnung lässt sich recht anschaulich, aber mit etwas mehr Raumaufwand, nach geometrischer Methode durchführen. Dies ist in der vorigen Auflage, S. 204 des 3. Bandes, für die elektrische Fernwirkung geschehen; die dortige Rechnung kann unmittelbar auch auf Magnetpole angewendet werden.

$$= \frac{m m^1}{2} \left[\frac{1}{r^2} + \frac{1}{r_1^2}\right] = \frac{m m^1}{2} \cdot \frac{r_1^2 + r}{r^2 r_1^2}$$

$$= \frac{m m^1}{2} \cdot \frac{(r + \delta)^2 + r^2}{r^2 r_1^2} = \frac{m m^1}{2} \cdot \frac{2r^2 + 2r\delta + \delta^2}{r^2 r_1^2}.$$

Lässt man nun δ immer kleiner werden, so verschwindet die Grösse δ^2 gegen die anderen Grössen im Zähler und man erhält die mittlere Kraft längs des Weges von r_1 nach r

$$= m m^1 \frac{r\,(r + \delta)}{r^2 r_1^2}.$$

oder da $\delta = r_1 - r$ diese Kraft

$$= \frac{m m^1}{r r_1}.$$

Multiplicirt man diese Kraft mit der Länge des Weges $r_1 - r$, so erhält man die Arbeit für die Verschiebung von r_1 nach r

$$= m m^1 \frac{r_1 - r}{r\, r_1} = m m^1 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1}\right).$$

Berechnet man in analoger Weise die Arbeiten für die übrigen Theilstrecken und summirt sie, so erhält man die Gesammtarbeit

$$= m m^1 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_2} - \cdots - \frac{1}{r_{n-1}} + \frac{1}{r_{n-1}} - \frac{1}{R}\right)$$

$$= m m^1 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R}\right).$$

Um also die beiden Pole von den Stärken m und m^1 aus dem Abstande R in den kleineren Abstand r zu bringen, muss man eine Arbeit

$$= m m^1 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R}\right)$$

aufwenden. Umgekehrt werden die Pole, indem sie, sich abstossend, ihre Entfernang von r auf R vergrössern, eine eben so grosse Arbeit zu leisten vermögen. Das System der beiden Pole ist also durch ihre Annäherung leistungsfähiger geworden, es besitzt im genäherten Zustande mehr Energie als vorher, ungefähr so, wie eine stark zusammengedrückte Spiralfeder mehr Energie hat, als wenn sie nur wenig zusammengedrückt ist. Diese Energie ist Energie der Lage oder potentielle Energie. Man drückt sich nun so aus: die potentielle Energie oder das Potential nimmt um

$$m m^1 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R}\right)$$

zu, sobald die Pole m und m^1 vom Abstand R auf den Abstand r genähert werden*). Umgekehrt nimmt das Potential ab, sobald der Abstand zunimmt. Lässt man den Abstand immer grösser werden, so giebt das System von seinem aufgespeicherten Energievorrath immer mehr ab, die von ihm geleistete Arbeit wird immer grösser, dafür der Potentialinhalt

*) Der Ausdruck Potential stammt von Green.

immer kleiner. Wird die Entfernung der Pole unendlich gross, so dass sie keine Kraft mehr auf einander ausüben, so ist die vom System abgegebene Arbeit

$$= m m^1 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\infty}\right) = \frac{m m^1}{r},$$

und damit ist auch der ganze Vorrath der potentiellen Energie erschöpft.

Wir sagen daher, die Pole m und m^1 haben im Abstande r das Potential $= \frac{m m^1}{r}$.

Wären die beiden Pole mit ungleichnamigem Magnetismus begabt, so würden sie sich gegenseitig anziehen. Zu ihrer Annäherung ist daher nicht nöthig, von aussen Arbeit zuzuführen, vielmehr leisten sie hierbei selbst Arbeit. Giebt man daher dem Potentiale der gleichnamigen Pole einen positiven Werth, so muss man das Potential der ungleichnamigen Pole als negativ bezeichnen. Dies stimmt auch damit überein, dass für $+ m$ und $- m^1$ der Ausdruck für das Potential $- \frac{m m^1}{r}$, also negativ wird.

Man findet also allgemein das Potential eines Systems zweier Magnetpole, indem man das Product ihrer Polstärken durch ihren Abstand dividirt.

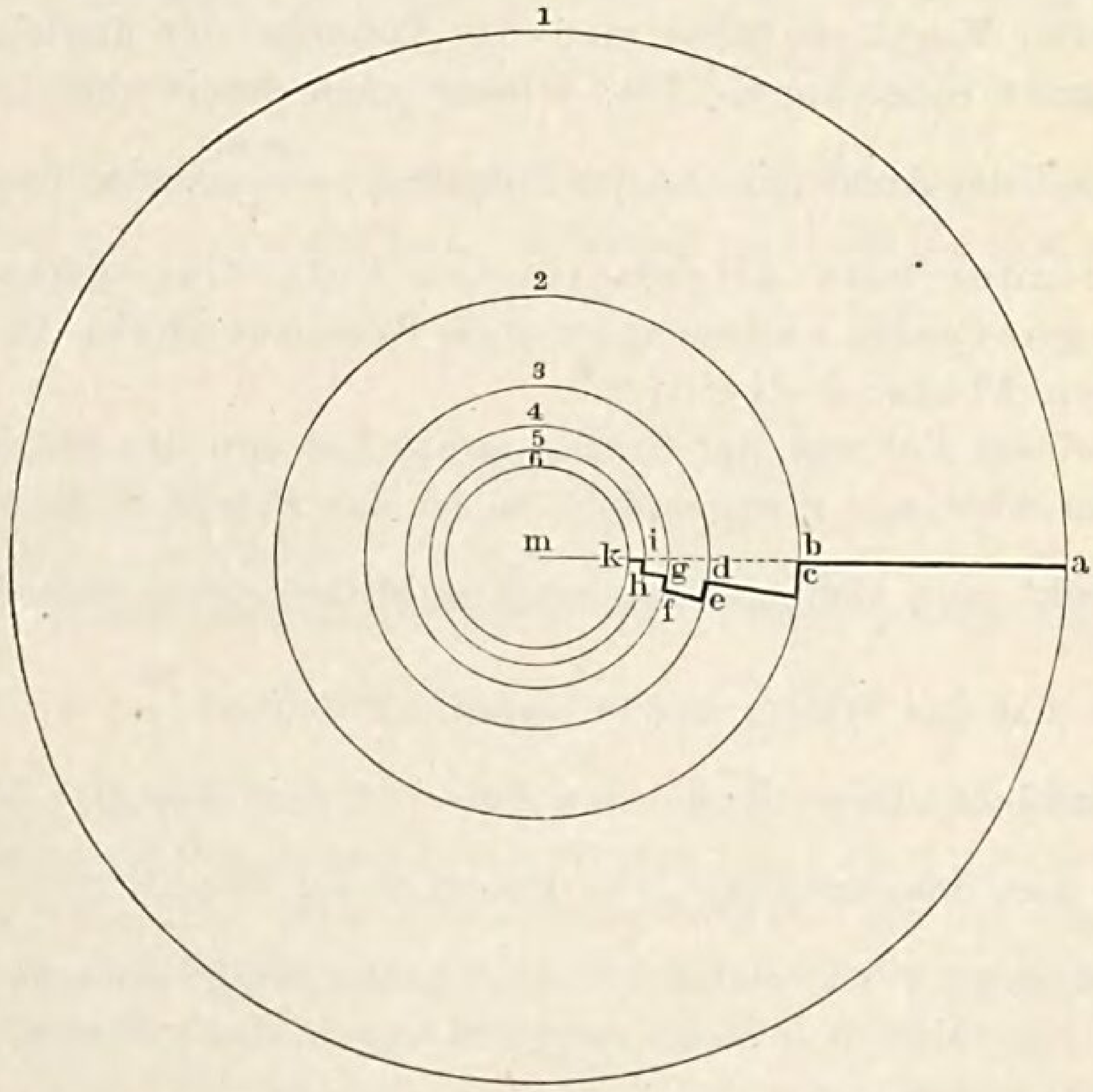
Steht einem Pol von der Stärke m ein Pol von der Stärke $+ 1$ in irgend einem Abstande r gegenüber, so ist das Potential dieses Systems $= \frac{m}{r}$. Denkt man sich m feststehend im Mittelpunkte einer Kugel vom Radius r, so hat das System immer dasselbe Potential $\frac{m}{r}$, wo immer wir auf der Oberfläche dieser Kugel den Pol $+ 1$ hinbringen. Man drückt dies nun so aus, dass man sagt, das Potential sei überall $= \frac{m}{r}$, wo der Abstand von $m = r$ ist; dabei ist nicht nothwendig, dass der Pol $+ 1$ wirklich da ist. Man will also damit nur sagen, das Potential hätte den Werth $\frac{m}{r}$, wenn ein Pol $+ 1$ da wäre. In dieser Weise spricht man also von dem Werth des Potentials an diesem oder jenem Orte, der einem magnetischen Felde angehört. Dabei hat man stets die physikalische Bedeutung des Potentials festzuhalten: Der Satz, das Potential an irgend einem Orte sei $= v$, will sagen, man müsste die Arbeit $= v$ aufwenden, um einen Pol von der Stärke $+ 1$ aus unendlicher Entfernung an den angegebenen Ort zu bringen; oder: es werde von den Polen die Arbeit v geleistet, indem der Pol $+ 1$ aus dem angegebenen Orte in unendliche Entfernung getrieben wird.

In der Umgebung eines positiven Pols ist demnach das Potential überall positiv und nimmt mit der Entfernung bis Null ab. In der Um-

gebung eines negativen Pols ist das Potential immer negativ; in unendlicher Entfernung wird es ebenfalls gleich Null. Da wir nun in der Algebra das Positive grösser, das Negative kleiner als Null ansehen, so bemerken wir, dass sich der Pol + 1 unter allen Umständen, sobald er sich selbst frei überlassen wird, von Orten grösseren Potentials zu Orten kleineren Potentials bewegt.

28 **Potentialniveauflächen eines Pols.** Im vorigen Paragraphen haben wir gezeigt, dass, wenn es möglich wäre, einen isolirten Pol herzustellen, das Potential rings um ihn herum in jedem Punkte, welcher gleich weit vom Pol entfernt ist, gleich gross wäre. Man nennt eine Fläche, welche die Punkte gleichen Potentials verbindet, eine Fläche

Fig. 63.



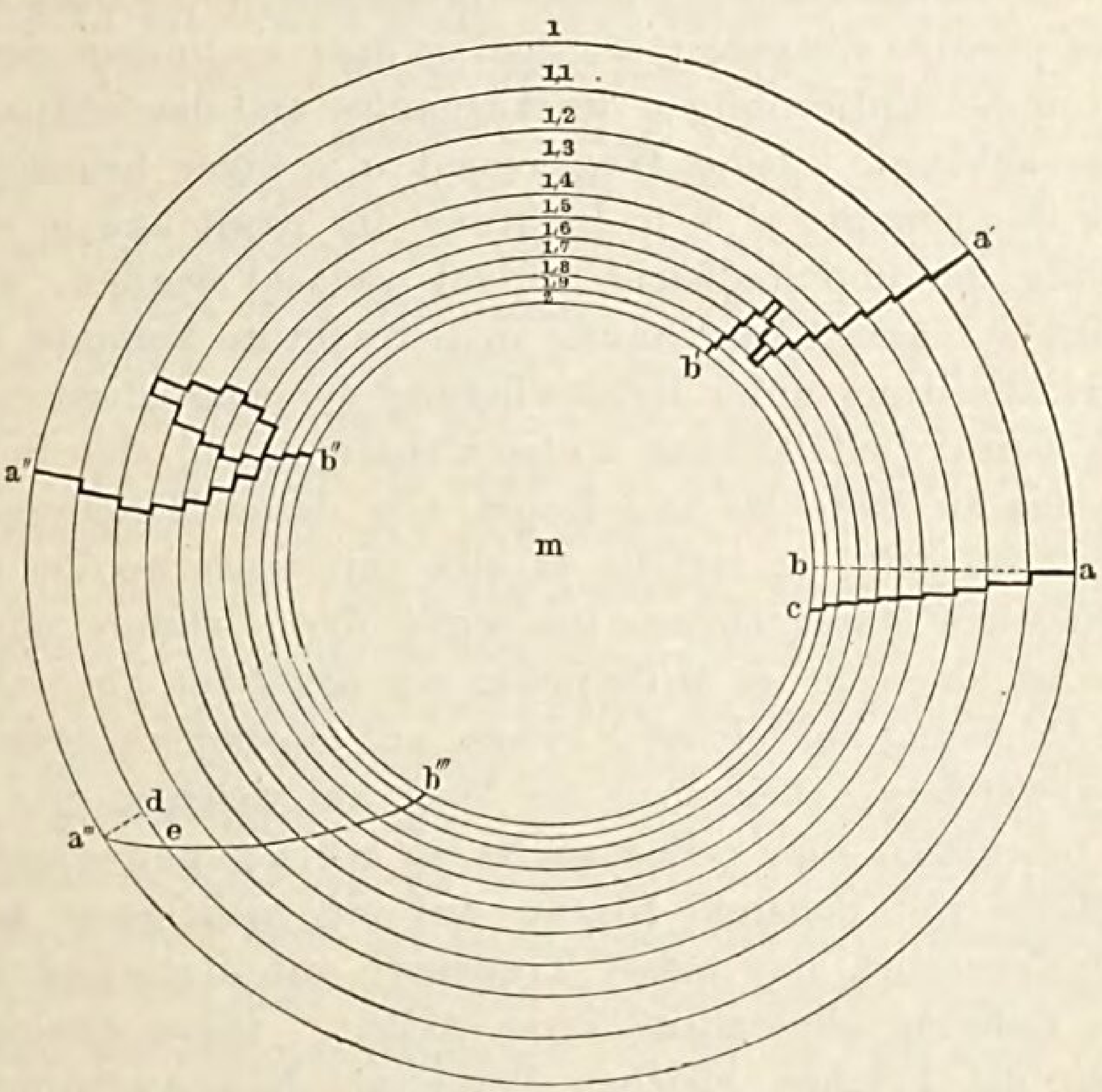
gleichen Potentials (äquipotentielle Fläche) oder auch Potentialniveaufläche (abgekürzt Potentialfläche, Niveaufläche). Die Potentialflächen eines isolirten Pols sind demnach concentrische Kugelflächen. Legt man eine Zeichenebene durch den Pol, so erscheinen darauf die Durchschnitte der Potentialflächen (Potentialcurven) in diesem Falle als concentrische Kreise. Dabei ist es sehr zweckmässig, das System der Potentialflächen so zu zeichnen, dass das Potential von einer Fläche zur nächstliegenden immer um dieselbe Grösse (Potentialdifferenz), z. B. um eine Einheit, ab- oder zunimmt.

In Fig. 63 ist dies ausgeführt. Die Radien der Kreise haben von aussen nach innen folgende Dimensionen:

Ordnungszahl:	1.	2.	3.	4.	5.	6.	
Radiuslänge:	36	18	12	9	7,2	6	(in Millimetern)
Verhältniss:	1	$^1/_2$	$^1/_3$	$^1/_4$	$^1/_5$	$^1/_6$.	

Setzen wir die Polstärke $m = 36$ und nehmen das Millimeter als Längeneinheit (d. h., denken wir uns die Zeichnung in $^1/_{10}$ der wirklichen Grösse ausgeführt, nach welcher 1 cm als Einheit gilt), so ist das Potential in Fig. 63 beim äussersten Kreise $= \frac{36}{36} = 1$, beim zweiten Kreise $= \frac{36}{18} = 2$, beim dritten Kreise $= 3$; es nimmt also immer um eine Einheit zu, wenn wir uns um ein Intervall nähern. [Wäre $m = -36$, so würde das Potential der Reihe nach $= -1, -2, -3 \ldots$

Fig. 64.



sein, also immer um 1 abnehmen, wenn wir uns um ein Intervall nähern, dagegen zunehmen, wenn wir uns von innen nach aussen um ein Intervall entfernen.] Dagegen bliebe das Potential unverändert und die aufgewendete Arbeit wäre daher = Null, wenn wir den Einheitspol auf einer der Potentialflächen verschieben würden. Es ist nun wichtig, einzusehen, dass es für die aufzuwendende Arbeit ganz gleichgültig ist, auf welchem Wege wir den Einheitspol vom kleineren zum grösseren Potential führen.

Um z. B. fünf Arbeitseinheiten aufzuwenden, könnten wir in Fig. 63 einmal den positiven Einheitspol von *a* aus direct auf dem Radius nach *k* führen; wir könnten aber auch auf dem treppenförmigen Wege von *a* über *b*, *c*, *d*, *e*, *f*, *g*, *h*, *i* nach *k* führen. Da die Bewegung auf den zwi-

schen die radialen Strecken eingeschalteten bogenförmigen Strecken keinen Arbeitsaufwand erfordert, so haben wir immer nur die radialen Strecken in Rechnung zu ziehen.

Um zu zeigen, dass wir uns auch auf einer beliebigen Curve bewegen dürften, wollen wir zunächst in Fig. 64 (a. v. S.) den Zwischenraum zwischen dem ersten und zweiten Kreise in zehn gleiche Potentialstufen eintheilen, so dass die Potentialdifferenz zwischen zwei Kreisen = $^1/_{10}$ wird*). Wir könnten dann zunächst den Weg, den wir in Fig. 63 von a über b nach c zurücklegten, in Fig 64 durch den mehrfach gestuften Weg $a\ c$ ersetzen. Es ist nun leicht einzusehen, dass wir uns die Eintheilung der Potentialstufen nur immer weiter fortgesetzt zu denken brauchen, um die treppenförmigen Wege immer mehr einer continuirlichen Curve anzunähern. Ja es kann dieser Weg auch theilweise rückwärts und wieder vorwärts, wie in $a'\ b'$ oder schlingenförmig wie in $a''\ b''$ zurückgelegt werden. Dabei kommen dann negative Arbeitsleistungen (Arbeitsverbrauche) vor, welche aber durch ebenso grosse positive compensirt werden, so dass die Summe der Arbeiten immer nur von den Entfernungen des Ausgangs- und des Endpunktes vom Kraftcentrum abhängt. Jedes Wegelement $a'''e$ einer beliebigen Curve kann in eine Componente $a'''d$ in Richtung der Kraft und in eine solche $d\,e$ in Richtung der Potentialfläche zerlegt gedacht werden, wovon nur die erstere bei der Arbeitsberechnung in Betracht zu kommen hat.

Die Arbeitsleistung unter Ueberwindung der magnetischen Kraft ist ganz analog der Arbeitsleistung unter Ueberwindung der Schwerkraft. Denken wir uns die Erde als eine Kugel, von deren Mittelpunkt die anziehende Kraft ausgeht, so verhält es sich mit einer an der Oberfläche der Erde gelegenen Masse ebenso, wie wenn diese letztere ein positiver Magnetpol wäre, dagegen im Mittelpunkt ein negativer Pol sich befinden würde. Die Erhebung von einem Niveau auf ein höheres erfordert stets dieselbe aufgewendete Arbeit, mag der Weg, auf welchem dies geschieht, wie immer beschaffen sein. Ebenso ist es mit der gewonnenen Arbeit, wenn die Masse von höherem Niveau auf ein niedrigeres zurückgeht. Horizontaler Transport, das heisst Transport auf demselben Niveau erfordert (von Reibung abgesehen) keine Arbeit. Diese Analogie ist es, weshalb man die Flächen gleichen Potentials Niveauflächen nennt.

So wie ein schwerer Körper, der frei beweglich sich selbst überlassen wird, von selbst aus höherem Niveau zu tieferem übergeht, nicht aber umgekehrt, so geht auch ein Magnetpol von selbst stets nur vom höheren zum tieferen Potentialniveau.

Auf der Erdoberfläche sind die Niveaudifferenzen für gleiche Arbeitsleistungen sehr nahe einander gleich, weil die uns zugänglichen Höhen

*) Man findet die entsprechenden Radien aus den Gleichungen

$$\frac{36}{r_1} = 1{,}1, \quad \frac{36}{r_2} = 1{,}2, \quad \frac{36}{r_3} = 1{,}3$$

und so fort. Diese Rechnung ergiebt dieselben

= 32,72, 30, 27,69, 25,71, 24, 22,5, 21,18, 20, 18,95 mm.

sehr klein sind im Verhältnis zum Abstande vom Mittelpunkte. Wir nehmen daher als praktische Arbeitseinheit das Kilogrammmeter an, ohne Rücksicht darauf, ob das betreffende Meter sich höher oder tiefer befindet. Bei einem Magnetpole sind die Entfernungen, mit denen man zu thun hat, selten so gross, dass die Abstände der benachbarten Niveauflächen als gleich angenommen werden dürfen. Diese Abstände nehmen im selben Verhältnisse zu, wie die Kraft abnimmt, da ja das Product aus Abstand und Kraft gleich der constanten Arbeit ist, welche beim Uebergange von einer Niveaufläche zur anderen geleistet oder verbraucht wird. Ein System von Niveaulinien kann daher, wenn nur die Anzahl derselben hinreichend gross ist, dazu dienen, für irgend einen Punkt nicht allein die Kraftrichtung, sondern auch die Kraftgrösse auszumitteln, indem man die Potentialdifferenz der beiden benachbarten Niveaulinien durch ihren Abstand dividirt. Das Resultat wird um so genauer ausfallen, je näher an einander die Niveaulinien gezogen sind.

Kraftlinien eines Pols. Ueberlässt man einen freibeweglichen 29
Magnetpol in der Nähe eines anderen sich selbst, so bewegt er sich in der Richtung der Kraft und beschreibt dabei eine Linie, welche man Kraftlinie heisst. Diese Kraftlinien sind im Allgemeinen Curven, die von einem Pole divergirend ausgehen und auf einem entgegengesetzten Pole wieder convergiren. Gäbe es in Wirklichkeit einen isolirten Pol, so wären seine Kraftlinien Radien. Unter allen Umständen müssen die Kraftlinien die Niveauflächen, also auch die Niveaulinien, senkrecht durchschneiden; denn nur dann wird die Projection der Kraft auf die Niveaufläche gleich Null, was eine Bedingung für jede Niveaufläche sein muss, da nur dann Bewegung auf derselben keine Arbeit erfordert.

Wir haben oben erfahren, dass die Niveauflächen nicht bloss die Kraftrichtung, sondern auch die Kraftgrösse an irgend einem Punkte des magnetischen Feldes erschliessen lassen. Sollen die Kraftlinien ebenfalls diesen doppelten Zweck erfüllen, so dürfen sie nicht in beliebiger Anzahl und Vertheilung construirt werden. Es ist Faraday's Verdienst, gezeigt zu haben, dass die Kraftlinien auch zur Darstellung der Kraftintensität sich eignen und es ist dies von Maxwell und Anderen weiter ausgeführt worden*).

Denken wir uns einen isolirten Pol mit m Einheiten freien Magnetismus begabt. Die von ihm ausgehenden m Krafteinheiten wollen wir durch m Kraftlinien in Form von Radien dargestellt denken, welche im Raume um den Pol ganz gleichmässig vertheilt sein müssen, da ja auch die Kraftwirkung ringsum eine gleichförmige ist. Stellen wir uns dann eine concentrische Kugelfläche vom Radius Eins vor, welche von diesen Kraftlinien durchsetzt wird. Es entstehen dadurch m Punkte, welche sich auf der Oberfläche vom Flächeninhalte $4\,\pi$ gleichmässig vertheilen. Es trifft daher durchschnittlich $\frac{m}{4\,\pi}$ solcher Punkte auf die Flächeneinheit. Die

*) Maxwell, Treatise on Electricity and Magnetism, übersetzt von Weinstein, I. Band, S. 179.

Kraft an dieser Oberfläche (auf einen Einheitspol) ist gleich m. Die Kraft ist also gleich der Anzahl der die Flächeneinheit senkrecht durchsetzenden Kraftlinien, multiplicirt mit 4π *).

Denken wir uns jetzt eine Kugel mit dem Radius R herumgelegt, so ist die Oberfläche $= 4 R^2 \pi$, die Anzahl der die Flächeneinheit durchsetzenden Kraftlinien $= \frac{m}{4 R^2 \pi}$, die Kraft daselbst $= \frac{m}{R^2}$, also wieder 4π mal grösser als die Zahl der Kraftlinien, welche die Flächeneinheit treffen. Man übersieht leicht, dass diese Anzahl mit dem Quadrat der Distanz abnehmen muss, da die Zahl aller Kraftlinien gleich bleibt, dagegen die Fläche, auf welche sie sich vertheilen, mit dem Quadrat der Distanz zunimmt. Der Sachverhalt ist durchaus analog der Abnahme der Beleuchtungsintensität mit dem Quadrat des Abstandes von der Lichtquelle. So wie man sich vorstellen kann, dass die Intensität der Beleuchtung mit der Anzahl der Lichtstrahlen proportional ist, welche die Flächeneinheit senkrecht treffen, ebenso kann man sich vorstellen, dass die Intensität der Kraft der Anzahl der Kraftlinien (Kraftstrahlen) proportional ist, welche die Flächeneinheit senkrecht durchsetzen.

Wollten wir nun ein System solcher Kraftlinien um einen Pol herum zeichnen, so würde dies keine Schwierigkeit bieten, wenn wir nur in der Zeichnungsebene die Kraftlinien gleich zu vertheilen hätten. Wir hätten nur ebenso viele Radien mit gleichem Winkelabstande zu ziehen. Allein es handelt sich um eine gleichförmige Vertheilung im Raume und da ergiebt sich eine Schwierigkeit. Wir können auf einer Kugeloberfläche nicht eine beliebige Anzahl und überhaupt nicht mehr als 20 gleich vertheilte Punkte anbringen, nämlich so, dass jeder Punkt von seinen Nachbarpunkten immer dieselbe Entfernung hat**). Wir sind daher gezwungen, eine andere Anordnung der Punkte zu wählen. Als solche empfiehlt sich jene auf den Durchschnittspunkten eines Systems von Meridianen und Parallelkreisen, indem man sich eine Axe durch die Kugel gelegt denkt. Würde man aber diese Parallelkreise in gleichen Breitenabständen wählen, so würden die Punkte gegen die Pole hin sich viel mehr anhäufen. Die Punkte sollen aber so vertheilt sein, dass durchschnittlich auf jeden gleich grossen Bruchtheil der Kugeloberfläche

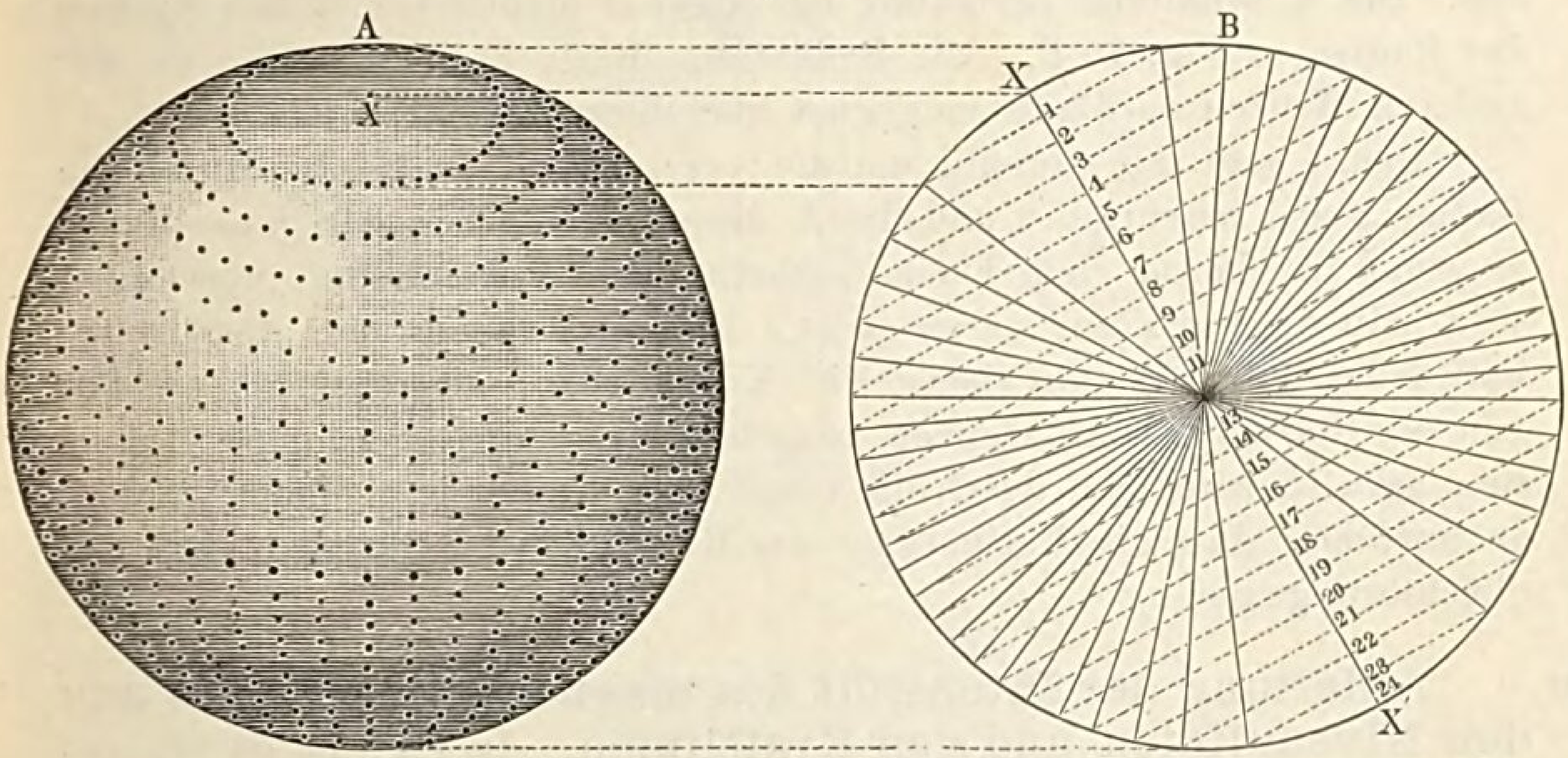
*) „Man pflegt sonst zweckmässig die Kraft direct gleich der Anzahl der Kraftlinien per Flächeneinheit zu setzen und denkt sich deshalb von der magnetischen Kraft m $4\pi m$ Kraftlinien ausgehend. Hier wollen wir die Kraftlinien wirklich zeichnen und können daher eine irrationale Zahl nicht brauchen, müssen uns also mit der Proportionalität begnügen. Wir müssten sonst von einer Masse $\frac{m}{4\pi}$ ausgehen, welche dann m Kraftlinien aussenden würde".

**) Die Lage dieser 20 Punkte würde den Ecken eines eingeschriebenen regulären Dodekaëders, oder den Mitten der Flächen eines umgeschriebenen Ikosaëders entsprechen. Da es keinen regulären Körper mit mehr als 20 Flächen oder Ecken giebt, so ist auch eine reguläre Anordnung von mehr als 20 Punkten auf einer Kugeloberfläche nicht möglich.

eine gleiche Anzahl derselben zu liegen kommt. Dies erreicht man dadurch, dass man die Parallelkreise gegen die Pole hin entsprechend weiter aus einander rückt. In Fig. 65 ist eine solche Vertheilung für eine grössere Anzahl von Punkten durchgeführt. Diese Figur zeigt unter *A* in der Vorderansicht eine mit der Axe oben nach vorn geneigte Kugel, unter *B* einen Durchschnitt derselben im Profil.

Nach einem Satze der Stereometrie wird eine Kugel in eine Anzahl Zonen von gleichem Flächeninhalte getheilt, indem man den Axendurchmesser in ebenso viele gleiche Theile theilt und durch die Schnittpunkte senkrechte Ebenen legt. In Fig. 65 *B* ist die Axe XX' in 24 gleiche Theile getheilt, durch die Theilpunkte sind Senkrechte auf die Axe gezogen und die entsprechenden Peripheriepunkte mit dem Mittelpunkte durch Radien verbunden. Denkt man sich diese um die Axe rotirend, so wird dadurch die Oberfläche in 24 Zonen gleichen Flächeninhalts

Fig. 65.



zerschnitten, deren jede durch die 48 Meridiane wiederum in 48 gleiche Flächenstücke zerschnitten wird, so dass die ganze Oberfläche in $24 \times 48 = 1152$ gleiche Flächenstücke getheilt erscheint. Die Eckpunkte dieser Flächenstücke sind auf der linksseitigen Hälfte der Fig. 65 *A* als isolirte Punkte der Kugeloberfläche eingezeichnet.

Der Zweck einer solchen, hier nur als anschauliches Beispiel durchgeführten Construction ist, wie oben angegeben, der, die Punkte so auf der Kugel zu vertheilen, dass ein beliebiges Flächenstück, welches man sich auf der Kugel aufgelegt und beliebig verschoben denkt, immer eine gleiche Anzahl von Punkten bedeckt. Diesen Zweck wird man, wie leicht einzusehen, nur dann genau erreichen, wenn die Abstände der Punkte verschwindend klein gegenüber den Dimensionen der Fläche sind. Man hätte daher eine unendlich grosse Menge von Punkten resp. Kraftlinien construirt zu denken, so dass gewissermaassen der ganze Raum durch die Kraftlinien ausgefüllt ist, wie ja auch die Kraftwirkung nicht

in gesonderten Strahlen, sondern continuirlich durch den Raum vertheilt ist. Da man aber in Wirklichkeit nur eine beschränkte Anzahl von Kraftlinien ziehen kann und die Zeichnung auf einer Ebene darstellen muss, so ist es am zweckmässigsten, auf folgende Weise vorzugehen. Wir denken uns die Zeichnungsebene durch die Axe des Kraftcentrums gelegt, stellen uns dann vor, die sämmtlichen Kraftlinien rotiren einmal um die Axe und es hinterlasse dabei jede derselben ihre separate Spur auf der Zeichnungsebene, dort, wo sie selbe durchschneidet. Hierauf denken wir uns die ganze Anzahl der so auf einer Seite der Axe abgebildeten Kraftlinien (wobei die über einander fallenden Bilder einzeln zu zählen sind) in so viele Gruppen gleicher Anzahl abgetheilt, als die Stärke des Kraftcentrums Einheiten enthält. Die Grenzlinien dieser Gruppen zeichnen wir auf die Ebene und erhalten so ein System von Kraftlinien, welche uns nicht als Durchschnittszeichnung, sondern als conventionelle Darstellung der im Raume vertheilten Kraftlinien dienen soll. Die so erhaltene Zeichnung ist offenbar identisch mit dem System der Radien in Fig. 65 *B*. Die Bedeutung dieser Figur ist, um es mit anderen Worten nochmals möglichst klar darzustellen, folgende:

Denkt man sich dieselbe um die Axe rotirend, so werden durch die Radien Kegel beschrieben und durch diese Kegelflächen der ganze Raum ringsum in ebenso viele Theile getheilt, als Krafteinheiten vorhanden sind. (In unserer Figur wären es 24.) Die Figur besagt nun, dass innerhalb jedes dieser Räume ebenso viel Kraftwirkung ausgehe, als ein Pol von der Stärke Eins im Ganzen ausgehen lässt. Hält man diese Bedeutung fest, so wird man durch die Construction nicht irregeführt werden, anzunehmen, dass die Vertheilung der Kraftlinien im Raume eine ungleichförmige sei.

30 **Ableitung der Intensität des magnetischen Feldes aus den Niveaulinien und den Kraftlinien.** In Fig. 66 ist ein zusammengehöriges System von Kraftlinien und Niveaulinien für ein Kraftcentrum von der Stärke $m = 10$ dargestellt, wobei der Raumersparniss wegen die eine Hälfte weggelassen ist. Als Einheit der Länge ist 6 mm angenommen. Der äusserste Kreis, dessen Radius zehn solcher Einheiten enthält, entspricht demnach dem Potential $\frac{10}{10} = 1$ der zweite dem Potential $\frac{10}{5} = 2$ und so fort.

Um aus dem Abstande d zweier benachbarter Niveaulinien die daselbst herrschende Intensität der Kraft f zu berechnen, haben wir nur zu bedenken, dass

Arbeit = Abstand × Intensität,

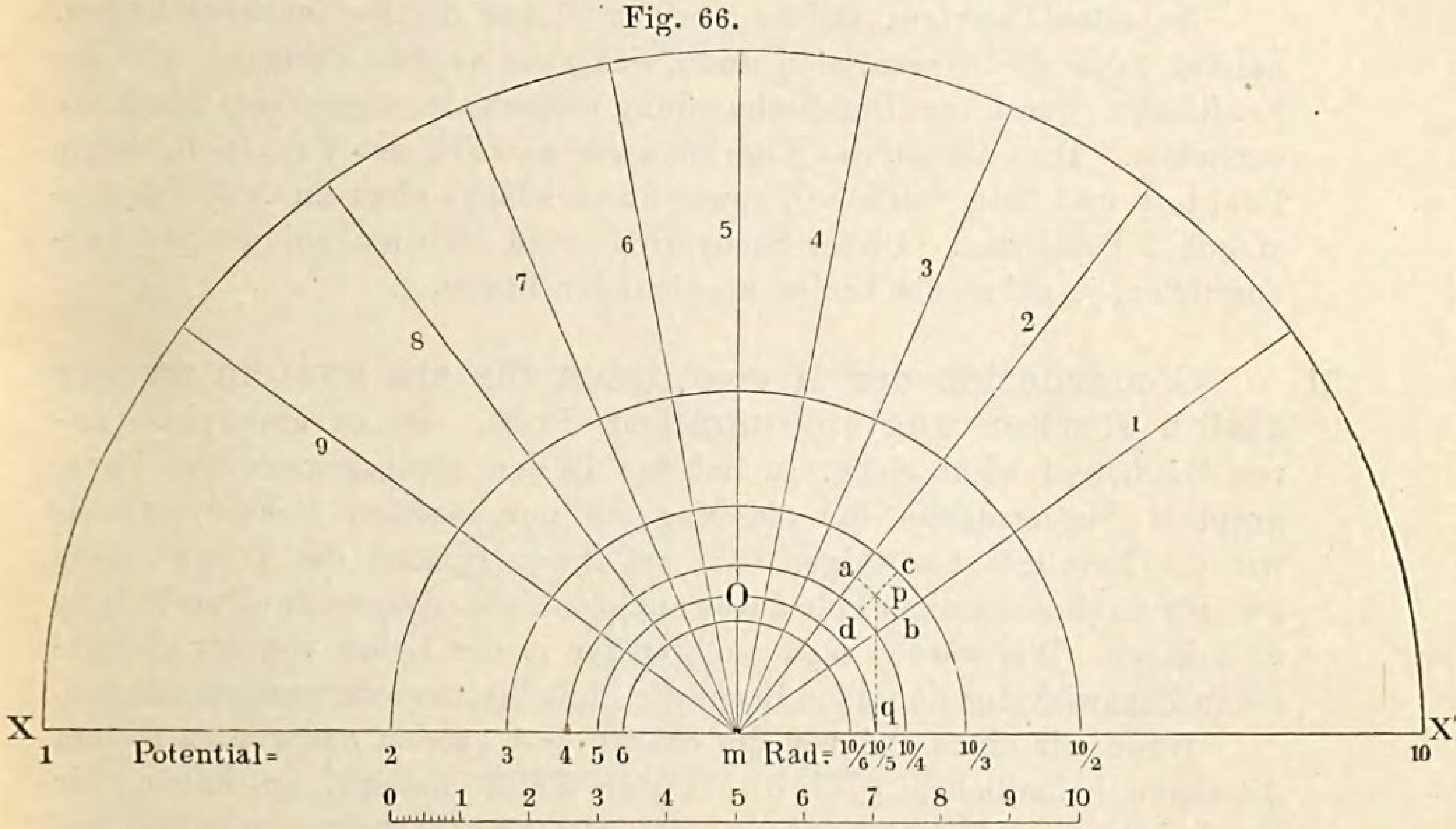
also, da die Arbeit = Potentialdifferenz = 1 genommen wurde:

$$1 = df, \quad f = \frac{1}{d} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

Beispiel. Der Punkt p, Fig. 66, liegt zwischen zwei Niveaulinien, deren Abstand $d = \frac{10}{3} - \frac{10}{4} = \frac{5}{6}$ ist, folglich herrscht daselbst die Kraftintensität $f = 1 : {}^5/_6 = {}^6/_5 = 1^1/_5$. Zur Probe können wir die Kraftintensität aus der Entfernung p von m berechnen. Diese Entfernung ergiebt sich durch Zirkelmessung = 2,83 Einheiten. Da in der Entfernung 1 die Intensität = 10 ist, so ist sie in der Entfernung $2{,}83 = \frac{10}{2{,}83^2}$, was sehr nahe $= 1^1/_4$ ist und sich von dem obigen Resultate $1^1/_5$ nur um $^1/_{20}$ unterscheidet.

Um aus dem Abstande b zweier Kraftlinien die Intensität der Kraft an einem Punkte p, der um $pq = r$ von der Axe absteht, zu berechnen, haben wir folgende Beziehung dieser Grössen zu beachten. Denken wir uns die Gerade $ab = b$ um die Axe XX' rotirend, so beschreibt sie eine Fläche, deren Flächeninhalt durch $2 r \pi b$

Fig. 66.



gegeben ist. Diese Fläche nimmt den mten Theil der von m ausgehenden Kraftlinien, also nur eine Kraftlinie auf. Es trifft also auf die Flächeneinheit nur $\frac{1}{2 r \pi b}$ Kraftlinien. Die Kraft selbst ist, wie oben abgeleitet, stets 4π mal so gross, als die Zahl der die Flächeneinheit durchsetzenden Kraftlinien, folglich ist diese Kraft

$$f = \frac{4 \pi}{2 r \pi b} = \frac{2}{r b} \quad \dots\dots\dots \quad 2)$$

Beispiel. Die Messung ergiebt bei demselben Punkte p für $b = ab$ 5 mm $= {}^5/_6$ Längeneinheiten, für $r = pq$ die Länge 2, folglich erhält man:

$$f = \frac{2}{2 \cdot {}^5/_6} = {}^6/_5 = 1^1/_5,$$

also dasselbe Resultat wie aus den Niveaulinien.

Endlich wollen wir noch für das Verhältniss zwischen dem Abstand benachbarter Niveaulinien und dem Abstand benachbarter Kraftlinien eine Beziehung ableiten; sie ergiebt sich direct aus 1) und 2):

$$\frac{1}{d} = \frac{2}{rb},$$

woraus

$$\frac{d}{b} = \frac{r}{2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

d. h. der Abstand der Niveaulinien d verhält sich zum Abstande der Kraftlinien b, wie die Entfernung des betreffenden Ortes von der Axe r sich zu 2 verhält.

An allen Punkten, welche um $r = 2$ von der Axe entfernt liegen, müssen daher die Niveaulinien unter sich eben so weit abstehen, wie die Kraftlinien; durch ihre Durchschneidung müssen also angenähert Quadrate entstehen. Dies ist in der Fig. 66 auch wirklich der Fall, z. B. beim Punkte p und beim Punkte O, sowie überall längs einer zu XX' im Abstande 2 Parallelen. Dieser Sachverhalt wird sich um so genauer herausstellen, je näher die Linien an einander liegen.

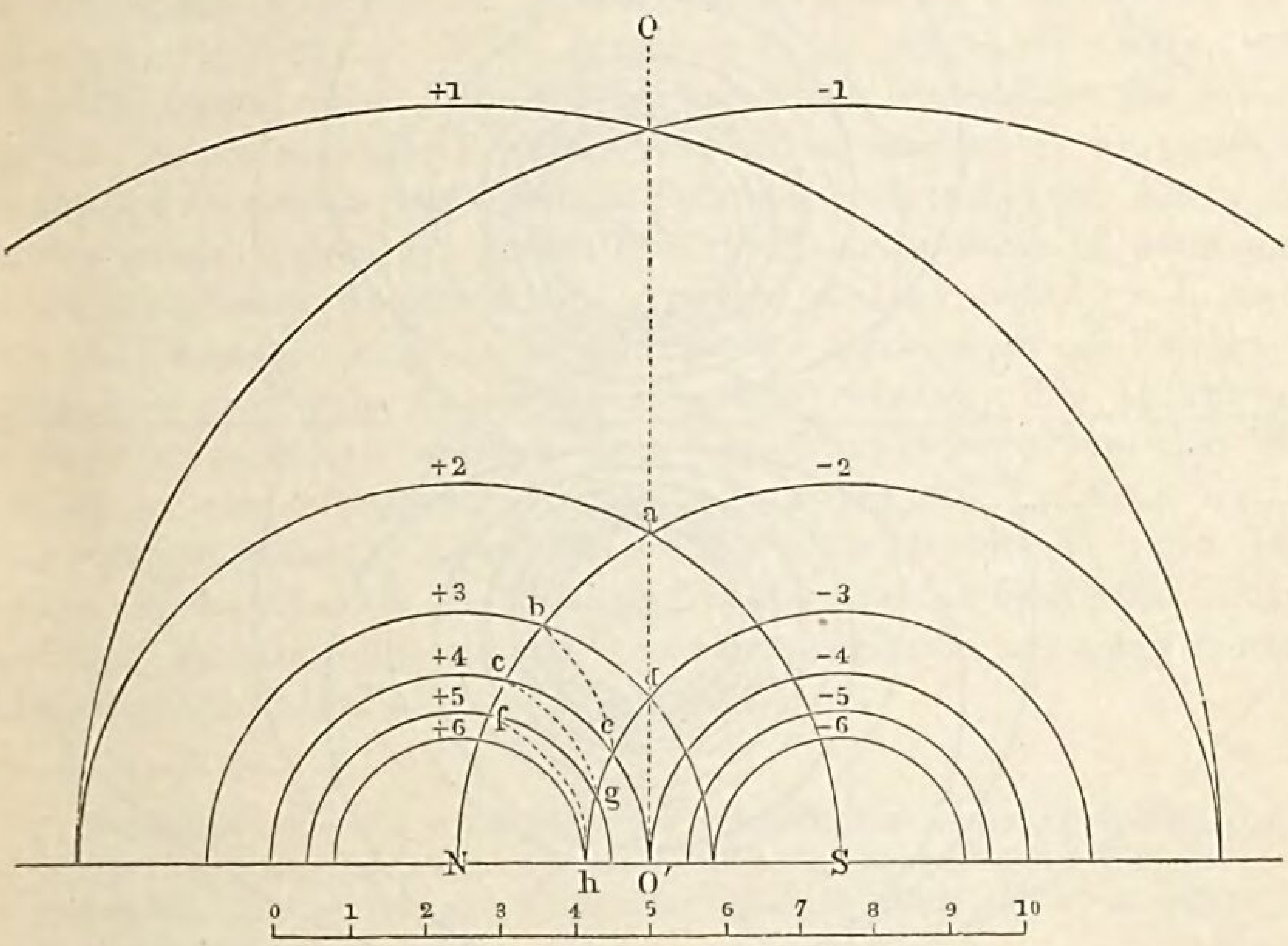
31 **Construction der Niveaulinien für ein System zweier gleich starker ungleichnamiger Pole.** Da es einen isolirbaren Magnetpol nicht giebt, so hat das in den vorausgegangenen Paragraphen Vorgetragene für die Magnete nur insofern Bedeutung, als wir die Resultate benöthigen, um auf ihnen fussend die Fernwirkung zweier ungleichnamiger Pole durch analoge Liniensysteme zur Darstellung zu bringen. Wir werden aber auch später in der Lehre von der elektrischen Fernwirkung dieselben Resultate ohne Weiteres verwerthen können.

Wenn wir einen Pol von der Stärke + 1 zweien anderen in festem Abstande befindlichen gleichnamigen Polen nähern, so haben wir zwei abstossende Kräfte zu überwinden, also zwei Arbeiten aufzuwenden. Da nach dem Unabhängigkeitsprincipe *) sich Kräfte gegenseitig nicht stören, sondern summiren, so müssen sich auch die Arbeitsleistungen summiren, und da das Potential nichts anderes ist, als eine Arbeitsgrösse, so müssen sich auch die Potentiale einfach summiren. Ist der eine der beiden Pole, dem wir uns nähern, ungleichnamig, so ist sein Potential entgegengesetzten Zeichens. Es ist dann die Gesammtarbeit bei der Annäherung gleich der Arbeit, welche zur Annäherung an den abstossenden Pol aufzuwenden ist, weniger der Arbeit, welche bei der Annäherung an den anziehenden Pol gewonnen wird. Wir wollen dies jetzt an der

*) Band I, S. 125.

Figur 67 näher erläutern. Die Punkte N und S stellen einen Nord- und einen Südpol vor. Um beide Punkte sind Systeme von Niveaulinien ganz derselben Art wie in Figur 66 gezogen. Die Werthe der Potentiale sind beigeschrieben; dieselben sind links positiv, rechts negativ, die ersteren nehmen daher je um + 1 zu, die letzteren um + 1 ab. Denken wir uns nun einen Pol + 1 aus unendlicher Ferne so an die beiden Pole N und S herangeschoben, dass er dabei immer gleiche Entfernungen von beiden behält, so wird er von beiden gleich grosse aber entgegengesetzte Kräfte empfangen, also ohne Arbeitsaufwand sich nähern lassen. Er beschreibt dabei offenbar einen Weg auf der durch die Mittellinie $0\,0'$ gelegten Symmetrieebene. Auf dieser ist die Summe der Potentiale stets gleich Null. Sie selbst ist daher die Niveaufläche Null, $0\,0'$ die

Fig. 67.



Niveaulinie Null. Nun denken wir uns, dass der Einheitspol, sobald er in dem Punkte a angekommen ist, längs des Kreises — 2 nach dem Punkte b gebracht werde, welcher Punkt sich auf dem Kreise + 3 befindet. Auf diesem Wege ist bezüglich des Poles S Arbeit weder aufgewendet noch verbraucht worden. Dagegen ist eine Arbeitseinheit aufgewendet worden, um die Abstossung von N zu überwinden. Im Punkte b ist demnach das Potential des ganzen Systems = 1, denn man braucht die Arbeit 1, um aus unendlicher Ferne in den Punkt b zu gelangen. Wollten wir von b aus ohne Arbeitsänderung weiter gehen, so müssten wir auf den Punkt e lossteuern, denn auch auf dem Punkte e ist das Potential des Systemes = 1. Wir könnten von b nach e auf verschie-

denem Wege gehen. Wählen wir den Weg auf den Kreisbögen *bc* und *ce*, so müssen wir auf dem ersten Theile dieses Weges eine Arbeitseinheit aufwenden, welche wir aber auf dem zweiten Theile des Weges, nämlich

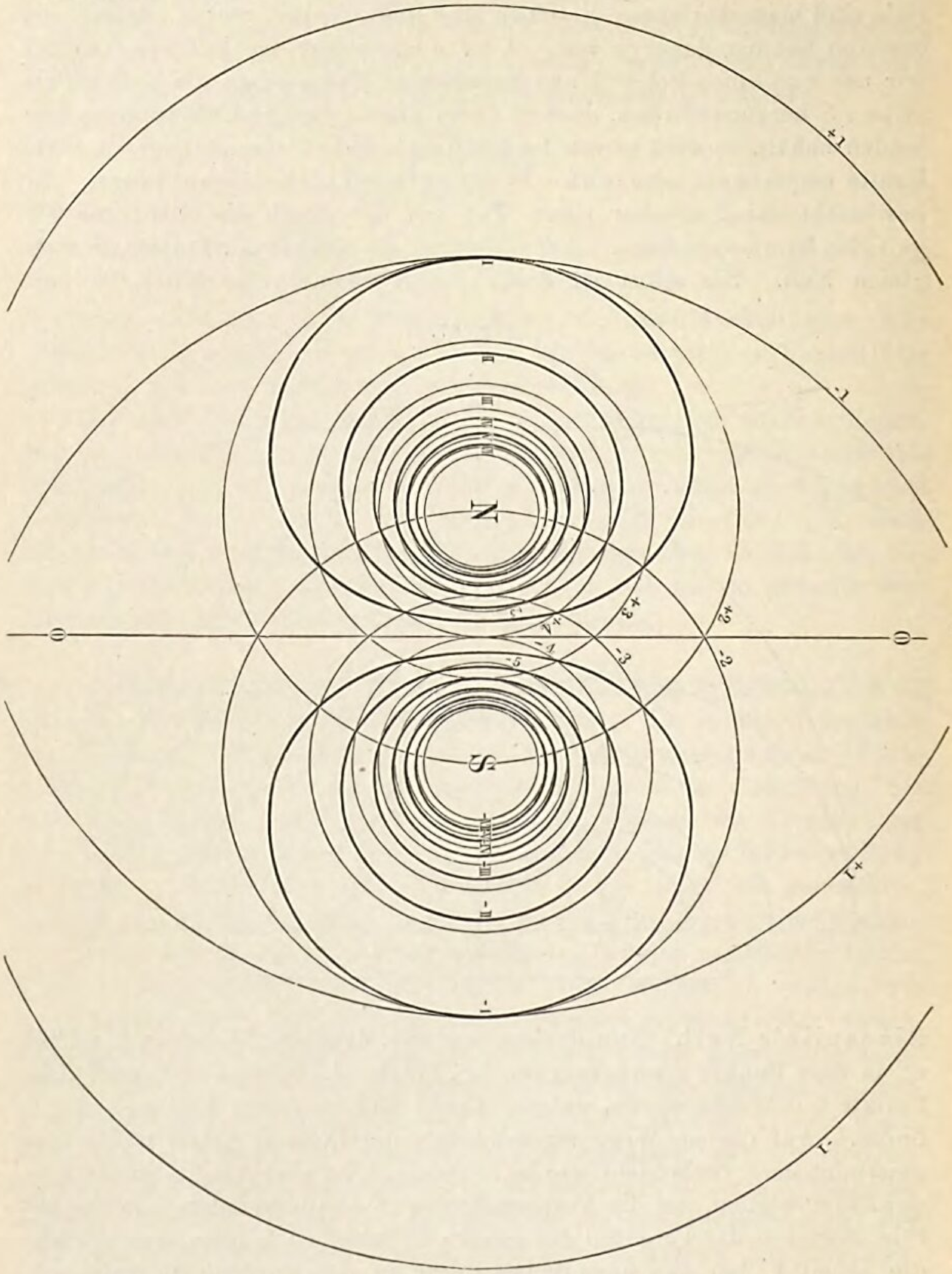


Fig. 68.

von *c* nach *e* wieder zurück erlangen. Auf dem Bogen *bc* müssen wir schieben, auf dem Bogen *ce* werden wir gezogen. Würden wir den Weg von *b* über *d* nach *e* einschlagen, so würden wir zuerst die Arbeitseinheit

gewinnen, um sie dann wieder aufwenden zu müssen. Wollten wir endlich von b nach e gelangen, ohne je einen Moment lang Arbeit zu verlieren oder zu gewinnen, so müssten wir den Weg der gestrichelten Curve einschlagen, welche so gezogen ist, dass in jedem Momente die Zunahme der Abstossung von N durch die Zunahme der Anziehung von S compensirt wird. Die Curve be ist daher ein Stück der neuen Niveaulinie mit dem Potential + 1. Durch Rotation derselben um die Axe NS erhielten wir die Niveaufläche 1. In ähnlicher Weise fortschliessend finden wir, dass die gestrichelte Curve cg der Niveaulinie des Potentials + 2, die Curve fh der Niveaulinie des Potentials + 3 angehört. In symmetrischer Weise würden wir auf der rechten Seite die Niveaulinien für die Potentiale — 1, — 2 und — 3 finden. Offenbar geht die Niveaulinie 0 durch alle Punkte, in welchen gleich numerirte Kreise sich schneiden. Die Niveaulinie 1 durch alle Punkte, in welchen sich die Kreise + 2 und — 1, + 3 und — 2, + 4 und — 3 etc. schneiden, kurz, man findet die irgend einem Potential entsprechende Niveaulinie des ganzen Systems, indem man alle Punkte verbindet, in welchen die algebraische Summe der Potentiale der einzelnen Pole den entsprechenden Werth hat. Um das ganze System der Niveaulinien wirklich zu zeichnen, muss man die ursprünglichen Kreise in viel grösserer Anzahl ziehen, z. B. nach Potentialdifferenzen von $^1/_{10}$ fortschreitend. Dazu muss die Zeichnung natürlich in grösserem Maassstabe ausgeführt werden. Die Ausführung hat dann keine Schwierigkeiten, denn man braucht immer nur den Diagonalen der rautenförmigen Figuren nachzugehen, die durch die Durchschneidung entstehen. Ausserdem stellt sich das Bedürfniss heraus, die Punkte auf der Axe, wo die Niveaulinien dieselbe durchschneiden, durch Rechnung zu ermitteln, da die Construction hierfür zu wenig genaue Anhaltspunkte liefert*).

*) Bezeichnen wir die Abstände eines solchen Durchschnittspunktes von N und S mit R und R^1, den Abstand N bis S mit a, die Polstärke mit $+m$ und $-m$, das Potential, für welches die Niveaulinie gesucht wird, mit v, so gelten folgende Gleichungen:

für den Durchschnittspunkt innerhalb NS: $$\left.\begin{aligned} R + R^1 &= a \\ \frac{m}{R} - \frac{m}{R^1} &= v \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots 1)$$

für den Durschschnittspunkt ausserhalb NS: $$\left.\begin{aligned} R^1 - R &= a \\ \frac{m}{R} - \frac{m}{R^1} &= v \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots 2)$$

Nach Auflösung der gemischten quadratischen Gleichungen, auf welche man dabei geführt wird, erhält man:

$$\text{aus 1)}\quad R = \frac{a}{2} + \frac{m}{v} - \sqrt{\frac{a^2}{4} + \frac{m^2}{v^2}}$$

$$\text{aus 2)}\quad R = -\frac{a}{2} + \sqrt{\frac{a^2}{4} + \frac{a\,m}{v}},$$

für die Fig. 67 und 68 ist $a = 5$, $m = 10$.

In Fig. 68 (a. S. 76) ist eine solche Construction für die Niveaulinien, welche den Potentialen von — 6 bis + 6 entsprechen, im nämlichen Maassstabe (6 mm Längeneinheit) ausgeführt. Die zur genaueren Zeichnung benutzten Zwischenkreise sind nachträglich wieder weggelassen, um das Bild nicht zu sehr zu überladen.

Die senkrecht auf NS stehende Mittelebene theilt als Niveaulinie für das Potential Null den ganzen Raum in zwei Hälften. Auf der linksseitigen ist das Potential überall positiv, auf der rechtsseitigen überall negativ. Die übrigen Niveaulinien stellen in sich geschlossene Curven dar, welche sich desto mehr Kreisen nähern, je mehr sich das Potential von dem Werthe Null entfernt. Auch hier gilt der Satz, dass die Bewegung eines Poles von irgend einem Ausgangspunkte zu irgend einem Endpunkte, mag der Weg wie immer eingeschlagen werden, in Summa immer eine Arbeit erfordert (liefert), welche der Differenz der Potentiale der beiden Punkte gleichkommt. Dabei ist nur das Eine vorausgesetzt, dass sich die Pole nicht gegenseitig durch Influenz verändern.

32 **Construction der Kraftlinien für ein System zweier gleichstarker ungleichnamiger Pole.** In Fig. 69 seien wiederum die beiden Pole N und S mit den Polstärken $m = 10$ und $m^1 = -10$ gegeben. Wir construiren um jeden dieser Pole ein System von Kraftlinien ganz wie in Fig. 66 und bezeichnen die von N ausgehenden mit $+1, +2 \ldots$, die von S ausgehenden mit $-1, -2 \ldots$. Hierauf verbinden wir in analoger Weise wie bei den Niveaulinien die Durchschnittspunkte jener Kraftlinien unter einander, welche derselben algebraischen Summe entsprechen. Um z. B. die resultirende Kraftlinie Nr. 3 zu construiren, verbinden wir die Durchschnittspunkte der Kraftlinien + 4 und — 1, + 5 und — 2, + 6 und — 3 u. s. f. Es ergiebt sich für die Zeichnung auch hier die einfache Regel, dass wir den Querdiagonalen der rautenförmigen Figuren zu folgen haben. Um dies einzusehen, beachten wir zunächst, dass nach Gleichung 2) im §. 30

$$f = \frac{2}{rb},$$

folglich die Intensität der Kraft f bei gleichem Abstande r verkehrt proportional der Breite b zwischen zwei Kraftlinien ist. Denken wir uns nun die Kraftlinien so zahlreich gezogen, dass benachbarte Linien als parallel angesehen werden können, wie in Fig. 70 (a. S. 80) an zwei Paaren solcher Linien dargestellt ist, so besteht zwischen der abstossenden Kraft f und der anziehenden Kraft f' das Verhältniss, wie zwischen der Breite b'

Die Rechnung ergiebt für $v =$	1	2	3	4	5	6
den Abstand des inneren Durchschnittspunktes von N. . . . $R =$	2,19	1,91	1,67	1,46	1,30	1,16
den Abstand des äusseren Durchschnittspunktes von N. . . . $R =$	5,00	3,09	2,29	1,83	1,53	1,32.

und der Breite b. Diesen selbst sind aber wiederum die Strecken op und oq proportional. Folglich gilt $f : f' = op : oq$. Die Resultirende der Kräfte f und f' muss daher die Richtung der Diagonale or haben.

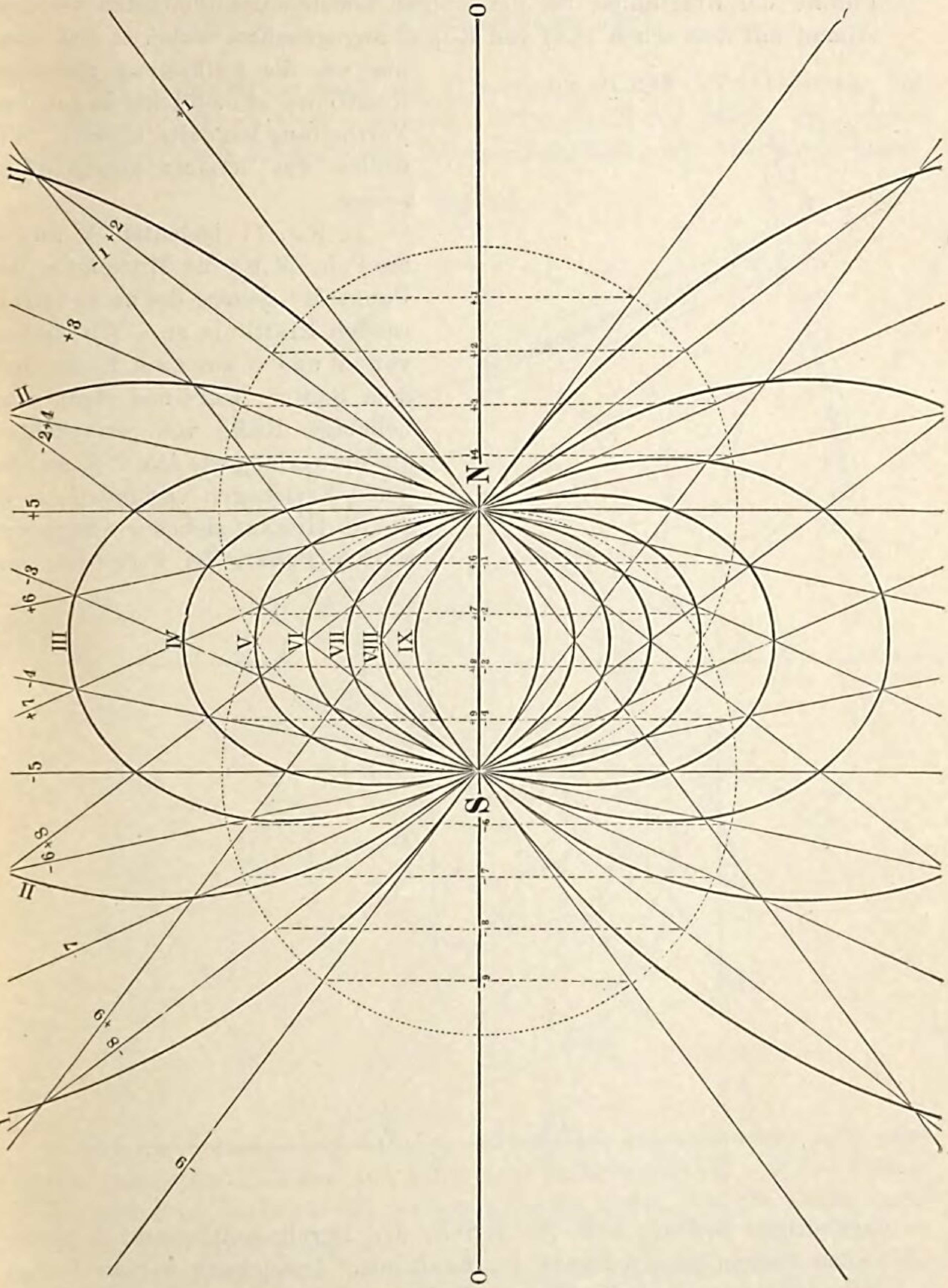


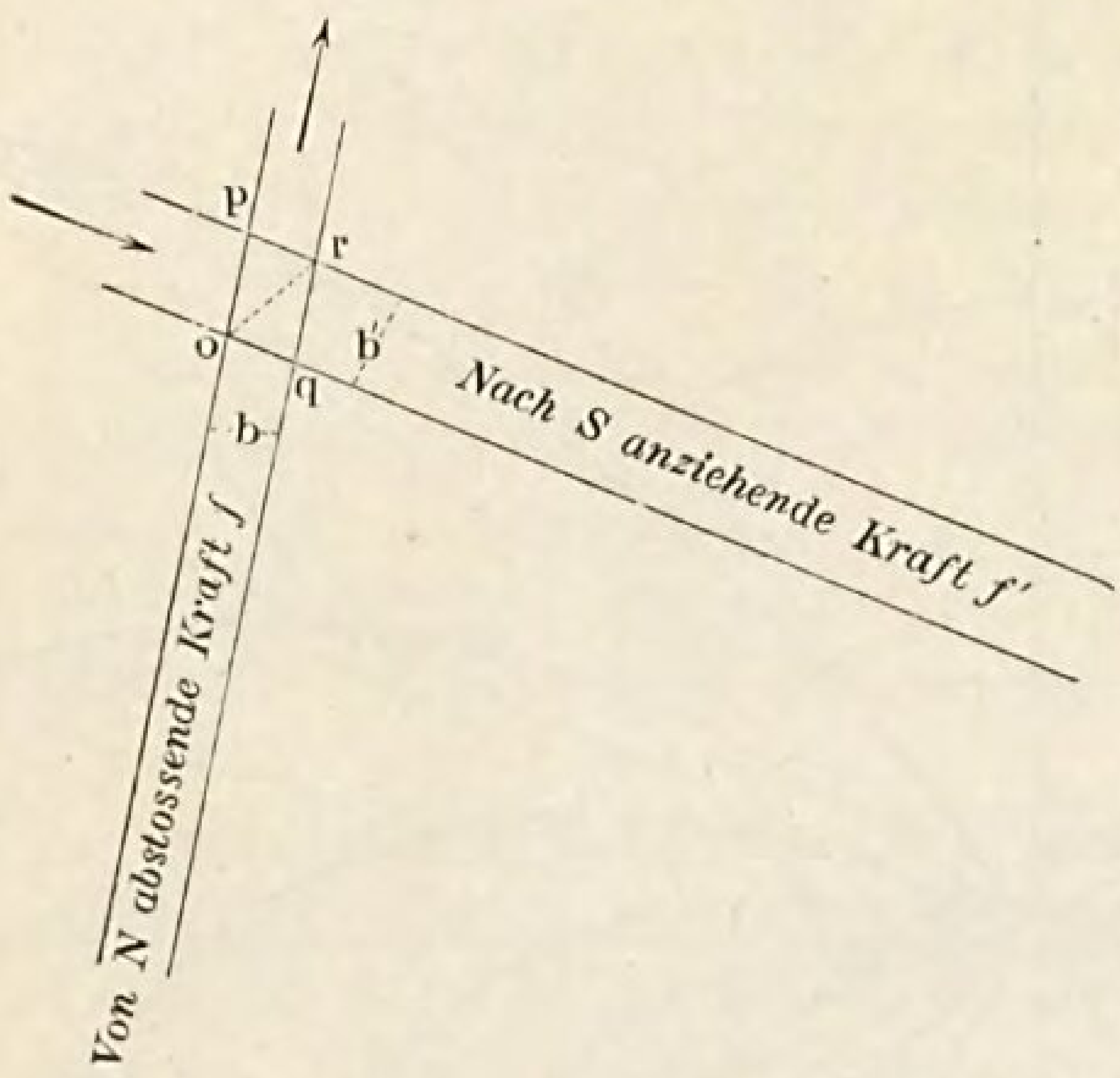
Fig. 69.

Zur genaueren Zeichnung des Kraftliniensystems ist ebenfalls erforderlich, dass man als Hülfslinien eine grössere Zahl zwischenliegender

Radien benutze. Dieselben sind in der Fig. 69 nachträglich wieder weggelassen.

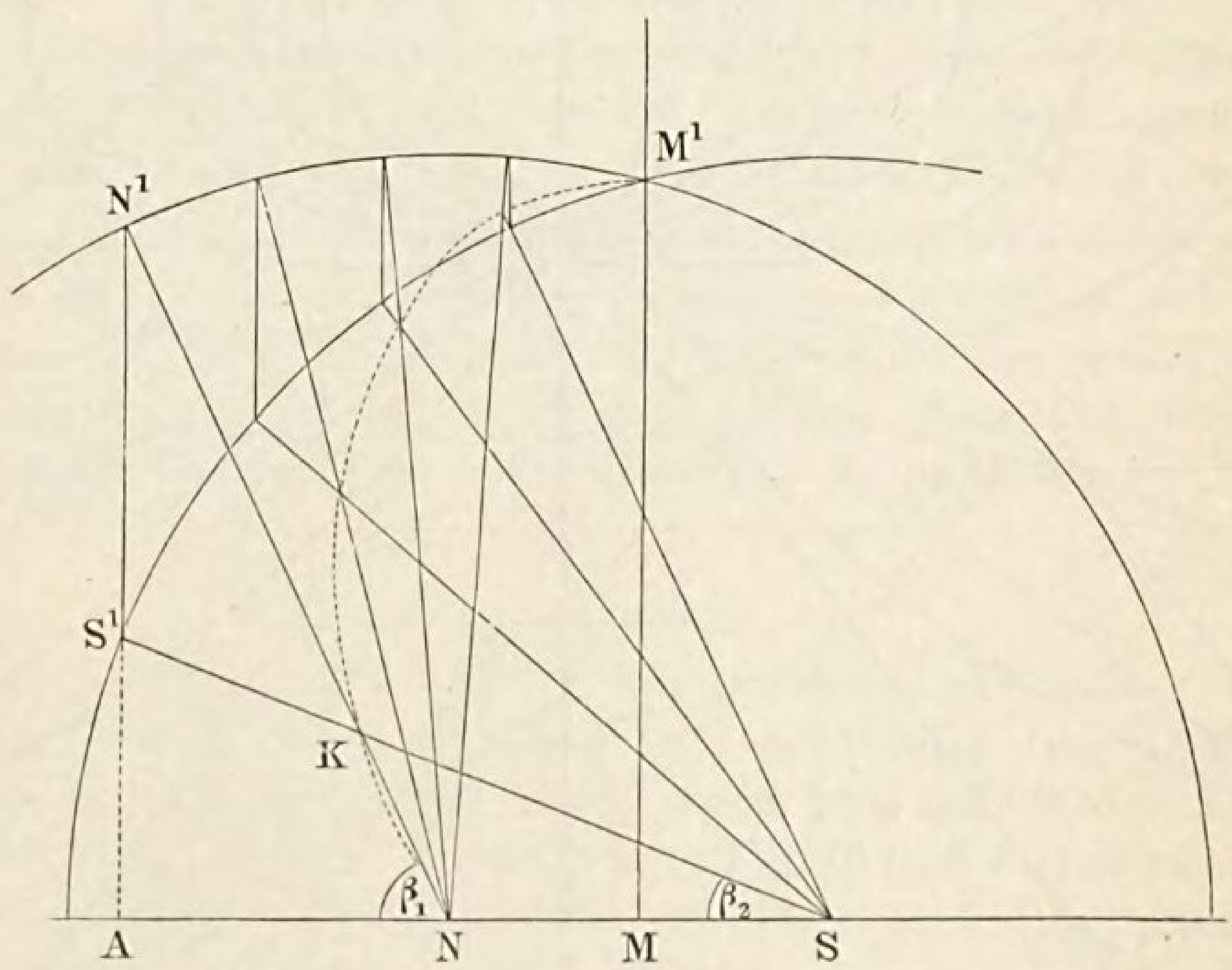
Das eben beschriebene Maxwell'sche Verfahren, nach welchem die Punkte der Kraftlinien bei der obigen Construction gefunden werden, stimmt mit dem schon 1831 von Roget angegebenen, wobei es sich aber nur um die Auffindung einzelner Kraftlinien ohne Rücksicht auf ihre Vertheilung handelte, überein. Wir wollen das letztere auseinandersetzen.

Fig. 70.



In Fig. 71 bedeuten N und S die Pole, MM^1 die Mittellinie, der Punkt M^1 gehöre der zu construirenden Kraftlinie an. Wir ziehen von N und S aus zwei Kreise mit dem Radius NM^1 und dann eine beliebige Reihe von Senkrechten auf die verlängerte Axe NS, welche beide Kreisbogen verbinden, z. B. $N^1 S^1$. Hierauf ziehen wir zu jedem solchen Punkte der Peripherie den

Fig. 71.

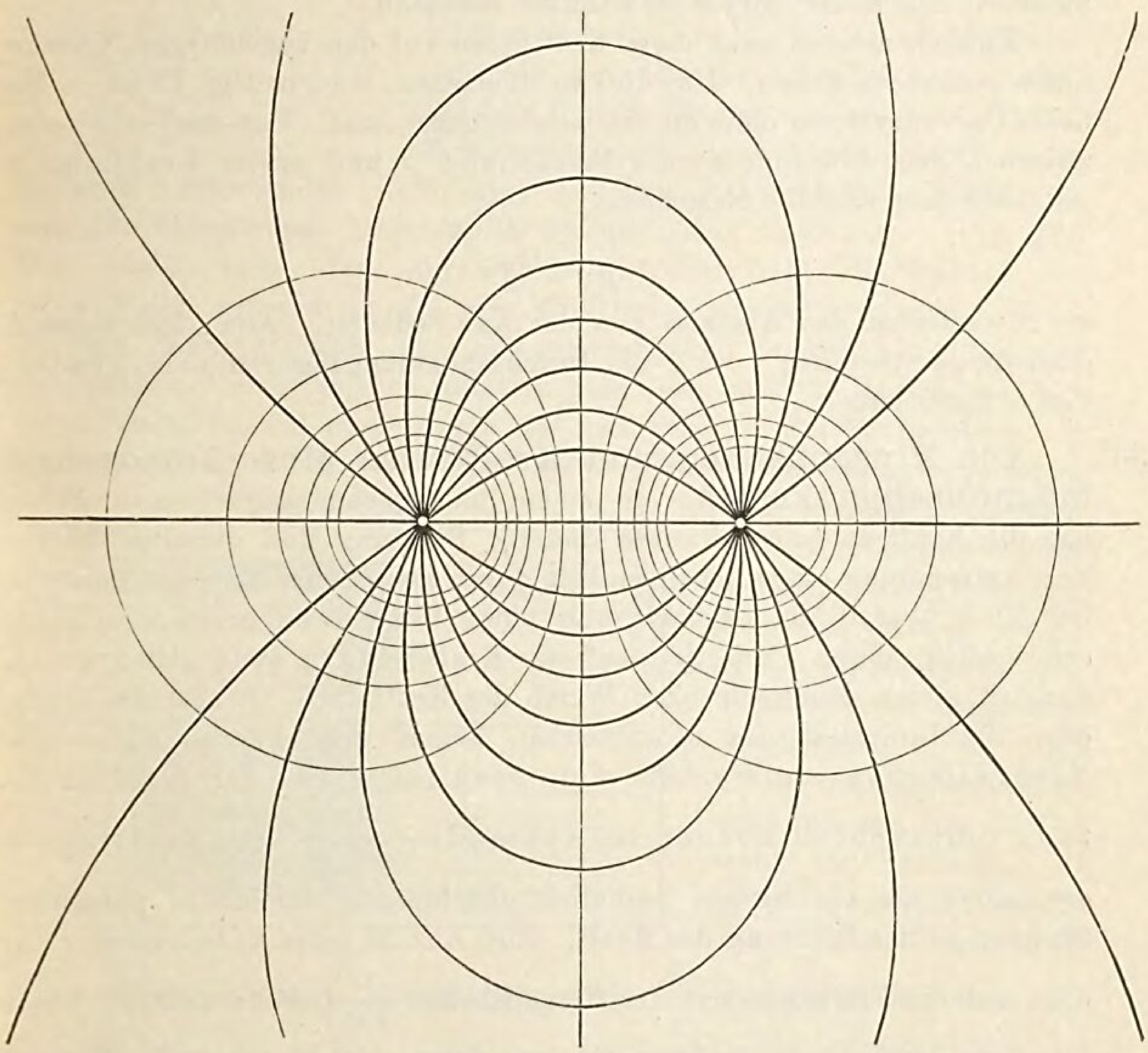


zugehörigen Radius, z. B. $N^1 N, S^1 S$; der Durchschnittspunkt K dieser beiden Radien ist ein Punkt der Kraftlinie. Bezeichnen wir die Länge NS wiederum mit a, die Winkel $N^1 NA$ und $S^1 SA$ mit β_1 und β_2, den Radius der Kreise mit r, so ist:

$$AS = r \cos \beta_2$$
$$AN = r \cos \beta_1$$
$$AS - AN = a = r (\cos \beta_2 - \cos \beta_1)$$
$$\frac{a}{r} = \cos \beta_2 - \cos \beta_1.$$

Diese Beziehung wird die Gleichung der Kraftlinie, die Grösse r ihr Parameter genannt. Jeder Kraftlinie gehört ein besonderer Werth von r an. Keine dieser Kraftlinien, mit Ausnahme jener,

Fig. 72.



welche die Verlängerung der Axe bildet, ist ungeschlossen, jede geht von dem einen Pole aus und kehrt zum anderen zurück. Wenn dies in der Abbildung nicht zutrifft, so kommt es nur daher, weil die Zeichnungsfläche nicht gross genug ist.

Die Bedeutung der Construction Fig. 69 ist ganz analog jener, die wir im §. 30 für das System der Kraftlinien eines isolirten Pols erörtert haben. Denkt man sich die Fig. 69 um die Axe NS rotirend, so wird

dadurch der umgebende Raum in zehn getrennte Räume zerschnitten. Die Figur will nun sagen, dass durch jeden dieser letzteren Räume hindurch von einem Pol zum anderen eine gleichgrosse Kraftwirkung stattfinde und zwar gleich dem zehnten Theile der ganzen Kraftwirkung, die überhaupt von den Polen ausgeht. Die Figur gestattet ferner ganz in derselben Weise, wie dies im §. 30 gezeigt wurde, die Ausmittelung der Intensität des Feldes an irgend einem Punkte, denn es lässt sich auch für diese Figur auf ganz gleiche Weise die Beziehung $f = \frac{2}{r\,b}$ ableiten, wo f die Kraft, r den Abstand des Punktes von der Axe, b die Breite zwischen den benachbarten Kraftlinien bedeuten.

Endlich müssen auch diese Kraftlinien auf den zugehörigen Niveaulinien senkrecht stehen. Um dies zu übersehen, sind in Fig. 72 (a. v. S.) beide Curvensysteme ohne die Hülfslinien gezeichnet. Für das Verhältniss zwischen dem Abstande zweier Niveaulinien d und zweier Kraftlinien b gilt auch hier dieselbe Beziehung,

$$\frac{d}{b} = \frac{r}{2},$$

wo r wiederum den Abstand von der Axe bedeutet. Auch hier müssen deshalb im Abstande $r = 2$ die Durchschneidungsfiguren nahe quadratische Form haben.

33 **Die Niveauflächen und Kraftlinien eines homogenen magnetischen Feldes.** In einem homogenen magnetischen Felde hat die Kraft in jedem Punkte dieselbe Richtung und dieselbe Stärke. Zur Aufwendung einer Arbeitseinheit durch Bewegung eines Einheitspols ist daher überall die Zurücklegung einer Wegstrecke gegen die Kraft erforderlich, deren Projection auf die Kraftrichtung stets gleich gross, nämlich gleich dem reciproken Werth der Kraft ist. Ist also die Kraft, oder die Intensität des magnetischen Feldes gleich f, so bilden die Niveauflächen ein System von parallelen auf die Kraftrichtung senkrechten Ebenen im Abstande $d = \frac{1}{f}$. Die Kraftlinien erscheinen als ein System räumlich gleichförmig vertheilter paralleler Geraden in der Richtung der Kraft. Ihre Anzahl muss so bemessen sein, dass auf die Flächeneinheit der Niveauebenen $\frac{f}{4\pi}$ Gerade treffen, denn nur dann folgt die Darstellung den Principien, welche wir im §. 29 auseinandergesetzt haben, welchen gemäss die Kraft immer 4π mal grösser ist, als die Anzahl der die Flächeneinheit senkrecht treffenden Kraftlinien *): Soll diese Vertheilung der Kraftlinien in einer Zeichenebene dargestellt werden, so begegnet man einer ähnlichen Schwierigkeit, wie bei der Darstellung der Kraftlinien eines Pols. Man könnte daran denken, eine der Niveauflächen als Zeichnungsebene zu benutzen und darauf die

*) Siehe die Anmerkung *) Seite 70.

Durchschnittspunkte der Kraftlinien in der Weise einzuzeichnen, wie in Fig. 73 angedeutet ist. Wenn aber eine den Kraftlinien parallele Ebene als Zeichnungsebene dienen soll, so würde es dann rein vom Zufalle oder von der Willkür abhängen, in welchen Abständen die parallelen Linien auf derselben erscheinen. Denken wir uns die Zeichenebene nach *ab* gelegt, so nimmt sie fünf Kraftlinien auf, in der Lage *ed* nur drei, in der Lage *ef* nur eine einzige. Wir entgehen den Schwierigkeiten durch Anwendung einer Darstellungsmethode, welche jener beim Kraftliniensystem eines Poles analog ist. Zu diesem Zwecke wählen wir eine der Kraftlinien als Axe, denken uns um dieselbe eine Reihe von conaxialen Cylinderflächen in solchen Abständen herumgelegt, dass die Querschnitte der dadurch entstehenden Hohlräume gleichen Flächeninhalt bekommen, wie der kreisförmige Querschnitt des innersten Cylinders. (Fig. 74.) Wir wissen dann, dass durchschnittlich jeder dieser Hohlräume von einer gleich grossen Anzahl von Kraftlinien durchzogen wird. Wenn wir uns dann vorstellen, dass das ganze System um die Axe rotire und dass während einer solchen Rotation jede Cylinderfläche so wie jede einzelne Kraftlinie auf einer durch die Axe gelegten Zeichnungsebene ein gesondertes Abbild hinterlasse, so würden wir als Zeichnung ein System von parallelen Geraden (die Durchschnitte der Cylinderflächen) erhalten, zwischen welchen je eine gleich grosse Anzahl von Kraftlinien abgelagert erscheinen. Nach der früher getroffenen Uebereinkunft soll nun die Anzahl der Kraftlinien so gewählt werden, dass auf die Flächeneinheit einer

Fig. 73.

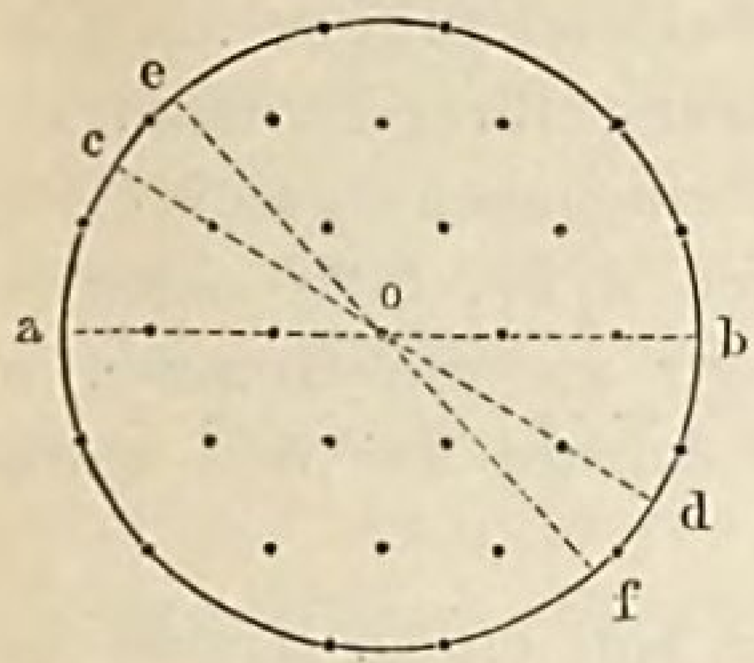
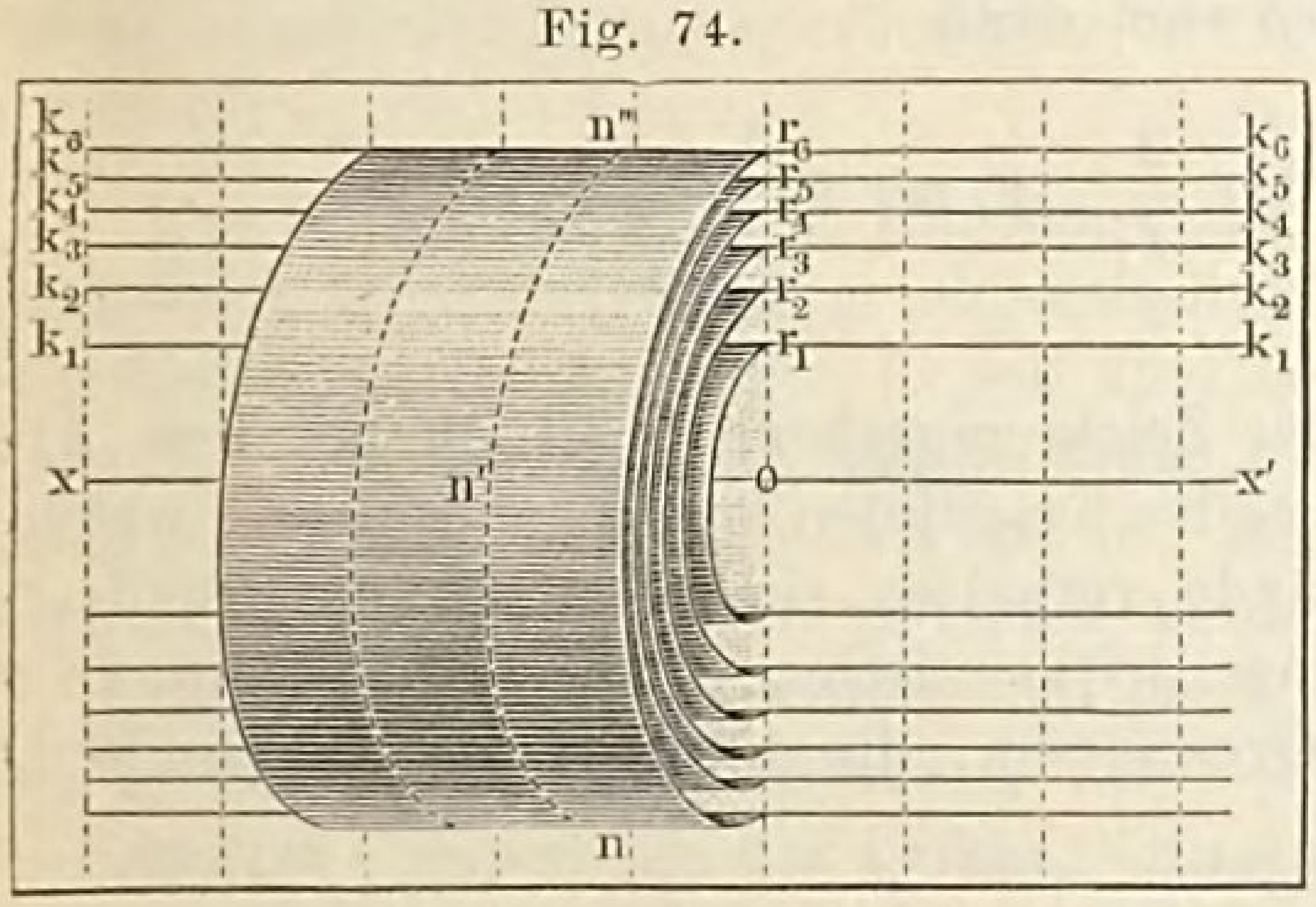


Fig. 74.



Niveaufläche immer $\frac{f}{4\pi}$ Durchtrittspunkte der Kraftlinien kommen. Es trifft demnach je eine Kraftlinie auf die Fläche $\frac{4\pi}{f}$. Wählt man daher die Radien der Cylinderflächen so gross, dass die Querschnitte der zwischen ihnen eingeschlossenen Hohlräume den Flächenraum $\frac{4\pi}{f}$ besitzen, so liefern die Durchschneidungslinien dieser Cylinderflächen mit der Zeichnungsebene (die Axe mitgezählt) genau so viele und ebenso angeordnete Kraftlinien, wie unsere Darstellungsmethode verlangt. Fig. 74

zeigt ein solches System, der Intensität 2,0 entsprechend, wenn wir als Längeneinheit das Centimeter wählen.

Um durch diese Zeichnung nicht irre geführt zu werden, muss man sich stets gegenwärtig halten, dass dieselbe, so wie die früher abgeleiteten Kraftliniensysteme eines Pols und zweier Pole nicht eine Durchschnittszeichnung, sondern eine Art Projectionszeichnung darstellt, bei welcher im Gegensatze zu anderen Projectionszeichnungen die abzubildenden Linien nicht durch geradlinige Bewegung ihrer Punkte, sondern durch Drehung um eine Axe auf die Zeichnungsebene geführt wurden. Auch hat man die eingezeichneten Linien $k_1 k_1$, $k_2 k_2$ eigentlich nicht als die Kraftlinien selbst, sondern vielmehr als die Grenzen der Räume zu betrachten, welche je eine gleiche Anzahl der den ganzen Raum erfüllenden Kraftlinien enthalten.

Der Radius r_1 der innersten Cylinderfläche soll einem Kreise vom Flächeninhalte $\frac{4\pi}{f}$ entsprechen, folglich muss

$$r_1^2 \pi = \frac{4\pi}{f},$$

also

$$r_1 = 2\sqrt{\frac{1}{f}}$$

sein.

Die Radien der folgenden sind dann

$$r_2 = 2\sqrt{\frac{2}{f}}, \quad r_3 = 2\sqrt{\frac{3}{f}}$$

und so fort.

Diese Radien sind in der Zeichnungsebene identisch mit den Abständen der auf einander folgenden Kraftlinien von der mittelsten, welche als Axe dient. Diese Abstände verhalten sich also wie die Quadratwurzeln aus den Gliedern einer arithmetischen Reihe. Die Abstände d der Niveauflächen und der Niveaulinien, die durch deren Durchschnitt mit der Zeichnungsebene entstehen, sind: $d = \frac{1}{f}$.

Für den Abstand b zwischen zwei benachbarten Kraftlinien, deren mittlere Entfernung von der Axe r und für die Kraft f erhalten wir folgende Beziehung. Denken wir uns diese beiden Kraftlinien um die Axe rotirend, so schneiden dieselben auf einer Niveaufläche einen Ring heraus, dessen Flächeninhalt $= b \, . \, 2 r \pi$ ist. Dieser Flächeninhalt muss aber nach Obigem auch gleich $\frac{4\pi}{f}$ sein. Aus der Gleichstellung

$$b \, . \, 2 r \pi = \frac{4\pi}{f}$$

folgt aber

$$f = \frac{2}{b\,r} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

also genau derselbe Zusammenhang, wie er zwischen diesen Grössen bei der Darstellung der Kraftliniensysteme von einem oder zwei Polen erhalten wurde. Es folgt dies auch schon aus folgender Betrachtung, durch welche wir ebenfalls zur Construction des Liniensystems des homogenen Feldes gelangen. Wir betrachten nämlich das homogene Feld als die Wirkung eines sehr weit entfernten auf derselben Axe gelegenen entsprechend starken Pols. Je weiter derselbe entfernt ist, desto mehr werden seine der Axe nächstliegenden Kraftlinien sich zu dieser parallel darstellen. Andererseits müssen sie in ihren Abständen der Beziehung 1) Folge leisten. Daraus folgt, dass wir dieses Kraftliniensystem ganz ebenso zur Combination mit den früheren benutzen dürfen, wie diese letzteren unter einander combinirbar sind. Dabei ist nur die Bedingung zu erfüllen, dass die zu combinirenden Systeme sich auf eine gemeinschaftliche Axe beziehen und nach übereinstimmendem Maassstabe gezeichnet seien. Wir werden hiervon sofort eine interessante Anwendung machen.

Kraftlinien eines Magnets, der sich im magnetischen Felde des Erdmagnetismus befindet. 34 Die Ergebnisse der beiden vorangegangenen Paragraphen setzen uns in die Lage, folgende Aufgaben zu lösen:

Erste Aufgabe: 1. Ein Magnet, aus den beiden Polen N und S bestehend, liege horizontal im magnetischen Meridian, so dass er mit dem Nordpol nach Norden zeigt. Es soll die Lage und Vertheilung der Kraftlinien in dem umgebenden magnetischen Felde, welches durch die vereinigte Wirkung des Magnetstabes und des Erdmagnetismus zu Stande kommt, durch Construction gefunden werden.

Die Polstärke des Magnetstabes betrage $m = 10$, wie in dem Beispiele des §. 32, die Entfernung der Pole fünf Längeneinheiten, die horizontale Componente des Erdmagnetismus sei gleich 0,2 (Centimeter, Gramm, Secunden*).

Wir führen zuerst die in Fig. 69 abgebildete Construction des Kraftliniensystems der beiden Pole aus. (In der Fig. 75 auf der linksseitigen Hälfte durch gestrichelte Curven gegeben.) Hierauf construiren wir mit derselben Axe das System der Kraftlinien des homogenen magnetischen Feldes von der Intensität = 0,2. Zu diesem Zwecke ziehen wir die axenparallelen Geraden in den Abständen:

*) Ein Werth, der in Deutschland dem thatsächlichen Werthe nahe kommt.

$$r_1 = 2\sqrt{\frac{1}{0{,}2}} = 2\sqrt{5} = 4{,}472,$$

$$r_2 = 2\sqrt{\frac{2}{0{,}2}} = 6{,}324,$$

$$r_3 = 2\sqrt{\frac{3}{0{,}2}} = 7{,}746^{*})$$

u. s. f. (In der Fig. 75 geradlinig punktirt.)

Wir beachten sodann die Richtung der Kraftlinien. Dieselben gehen einerseits vom Pol N des Magnetstabes zum Pol S desselben, andererseits von Süden (Nordpol der Erde) gegen Norden (Südpol der Erde). Haben wir uns diese Richtungen der Componenten durch Pfeile angedeutet, so brauchen wir nur, wie in früheren Fällen, die Durchschnittspunkte jener Kraftlinien durch eine Curve zu verbinden, welche die gleiche algebraische Summe ihrer Nummern geben. Es kommt dies auf ein fortlaufendes Ziehen der Diagonalen hinaus, welche die viereckigen Durchschnittsfiguren durchschneiden**). Fig. 75 zeigt die Hälfte eines auf diese Weise erhaltenen Kraftliniensystems.

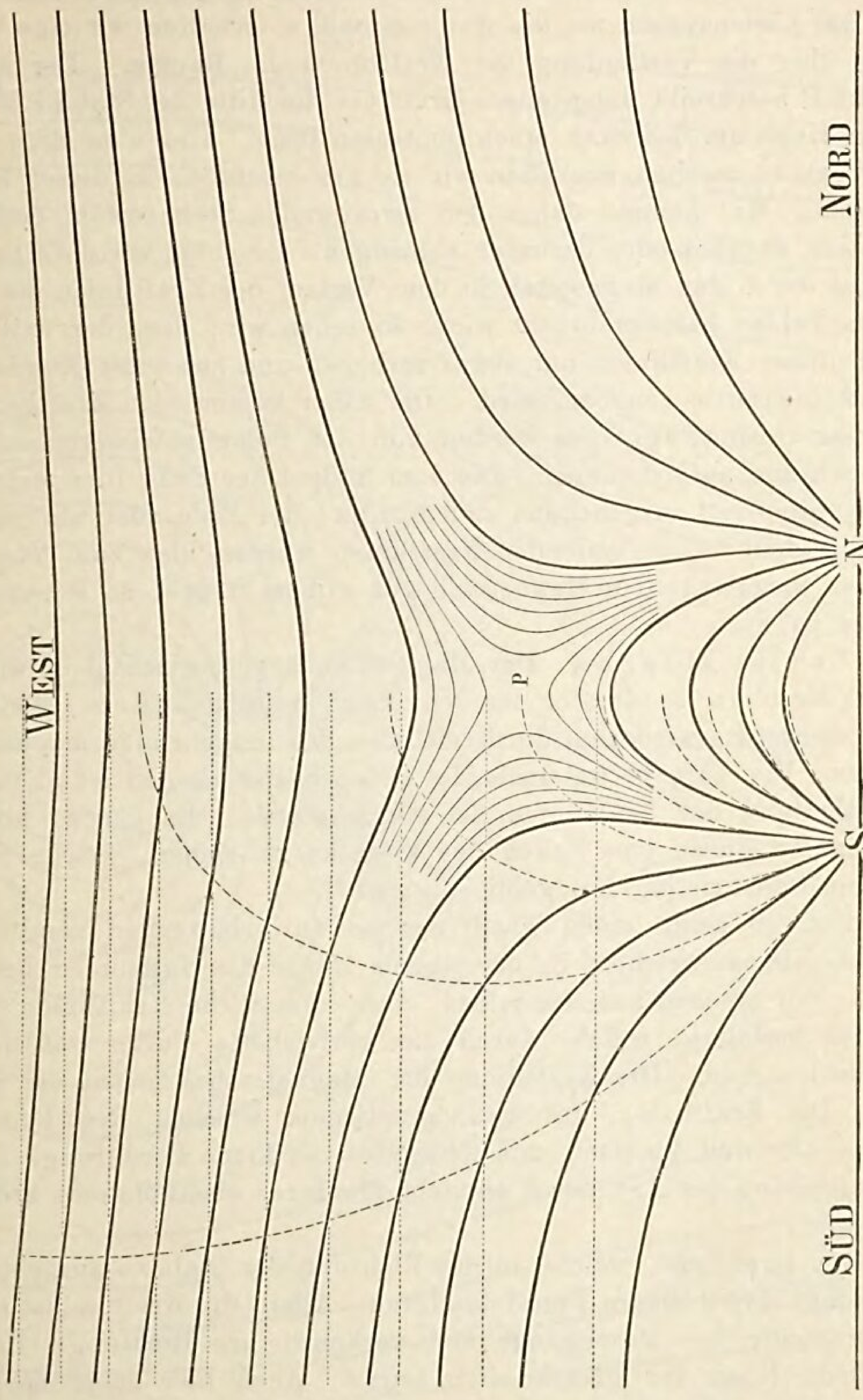
Wie man sieht, nehmen nur die vier innersten Linien annähernd denselben Verlauf wie früher von Pol zu Pol. Von der fünften Linie an schliessen die Zweige nicht mehr zusammen, sondern weichen einander aus und erstrecken sich dann nach entgegengesetzten Richtungen. Es entstehen dadurch auf der Zeichnungsebene zu beiden Seiten der Magnetmitte leere Stellen, deren genauere Lage in Fig. 75 durch Einschaltung von neun Zwischenlinien gekennzeichnet ist. An dieser Stelle ist ein Punkt P, wo keine Kraft herrscht. Geht man mit einer Magnetnadel von der Magnetmitte allmälig über diesen Punkt hinweg, so wechselt dabei die Nadel ihre Richtung in die entgegengesetzte, ebenso, wenn

*) Da man dasselbe Kraftliniensystem der zwei Pole zu mehreren Aufgaben benutzen kann, so ist es zweckmässig, das Kraftliniensystem des homogenen Feldes auf Pausepapier zu zeichnen und auf ersteres aufzulegen. Das resultirende Kraftliniensystem wird dann auf einem zweiten daraufgelegten Pausepapier gezeichnet. Sollen diese Zeichnungen einigermaassen genau ausfallen, so muss man zwischen den zehn Kraftlinien des ersten Systems noch je neun Zwischenlinien ziehen, d. h. von vornherein hundert Kraftlinien zeichnen und demgemäss auch die Linien des zweiten Systems verzehnfachen. Als Maassstab der Zeichnung möchten wir das Zehnfache der obigen Holzschnitte empfehlen, so dass 6 cm als Längeneinheit gilt. Man benöthigt dann zur Ausführung der einen Hälfte eine freie Zeichenfläche von 130 cm Länge und 50 cm Höhe.

**) Hat man bei der ersten Construction 100 Kraftlinien gezeichnet und auch die Parallellinien in zehnfacher Anzahl gezogen, so kann man die Curven fast überall sicher ziehen und hat nur an einigen Stellen durch Interpolation nachzuhelfen. Bei Anfertigung der Fig. 75 ist dies geschehen, doch wurden die Zwischenlinien nachher grösstentheils wieder fortgelassen, um die Zeichnung nicht zu sehr zu überladen.

man parallel dem Magnetstabe darüber weggeht. Während des Richtungswechsels muss aber einmal die Kraft gleich Null sein.

Fig. 75.



Schon der relativ grosse gegenseitige Abstand der Kraftlinien lässt darauf schliessen, dass auch in der Nachbarschaft jenes Punktes die Intensität des magnetischen Feldes sehr gering ist. Die Magnetnadel ist daher an dieser Stelle astatisch, d. h. sie erfährt keine

Richtkraft, weil die Richtkraft des Stabes und der Erde sich gerade aufheben. Näher am Magnetstabe überwiegt dessen Wirkung, weiter von ihm ab überwiegt die Richtkraft des Erdmagnetismus. Denken wir uns das Liniensystem um die Axe rotirend, so erhalten wir eine Vorstellung über die Vertheilung der Kraftlinien im Raume. Der neutrale Punkt P beschreibt dabei einen Kreis um die Mitte des Stabes. Es giebt daher rings um den Stab einen neutralen Ring. Um eine Magnetnadel astatisch zu machen, brauchen wir sie nur irgendwo in diesen Ring zu bringen. Wir können daher den astasirenden Stab sowohl östlich als westlich, darüber oder darunter anbringen. Beachten wir die Störung, welche durch den Magnetstab in dem Verlauf der Kraftlinien des homogenen Feldes hervorgebracht wird, so sehen wir, dass der entferntere Theil dieser Kraftlinien nur etwas verbogen und zwar mit dem Ausbuge der Magnetmitte genähert wird. Die näher kommenden Kraftlinien des Erdmagnetismus hingegen werden von den Polen gewissermaassen angezogen und aufgenommen. Die vom Südpol der Erde (der magnetisch ein Nordpol ist) ausgehenden zum Nordpol der Erde (der ein magnetischer Südpol ist) verlaufenden Kraftlinien werden also zum Theil veranlasst, unterwegs den Magnetstab von seinem Südpol zu seinem Nordpol zu passiren.

Zweite Aufgabe. Der Magnetstab liege horizontal im magnetischen Meridian, so dass er den Nordpol gegen Süden gekehrt hat. Man construire wiederum die Kraftlinien des umgebenden magnetischen Feldes. Die Aufgabe unterscheidet sich von der vorigen lediglich durch die Richtung der Kraftlinien des Magnetstabes. Es genügt also, die Diagonalen durch jene Ecken der Vierecke zu ziehen, welche bei der vorigen Construction frei geblieben sind*).

Fig. 76 zeigt einen Theil des so zu erhaltenden resultirenden Liniensystems, welchem in der oberen Hälfte die Hülfslinien beigefügt sind. Wir ersehen aus demselben, dass sämmtliche Kraftlinien in zwei Partien zerfallen, welche durch die gestrichelte Curve von einander geschieden sind. Die Kraftlinien des Magnetstabes gehen von Pol zu Pol. Die Kraftlinien des Erdmagnetismus weichen den Polen des Stabes aus und kommen mit demselben in keine Berührung. In der Verlängerung der Axe bei P entsteht hierdurch ebenfalls eine kraftleere Stelle**).

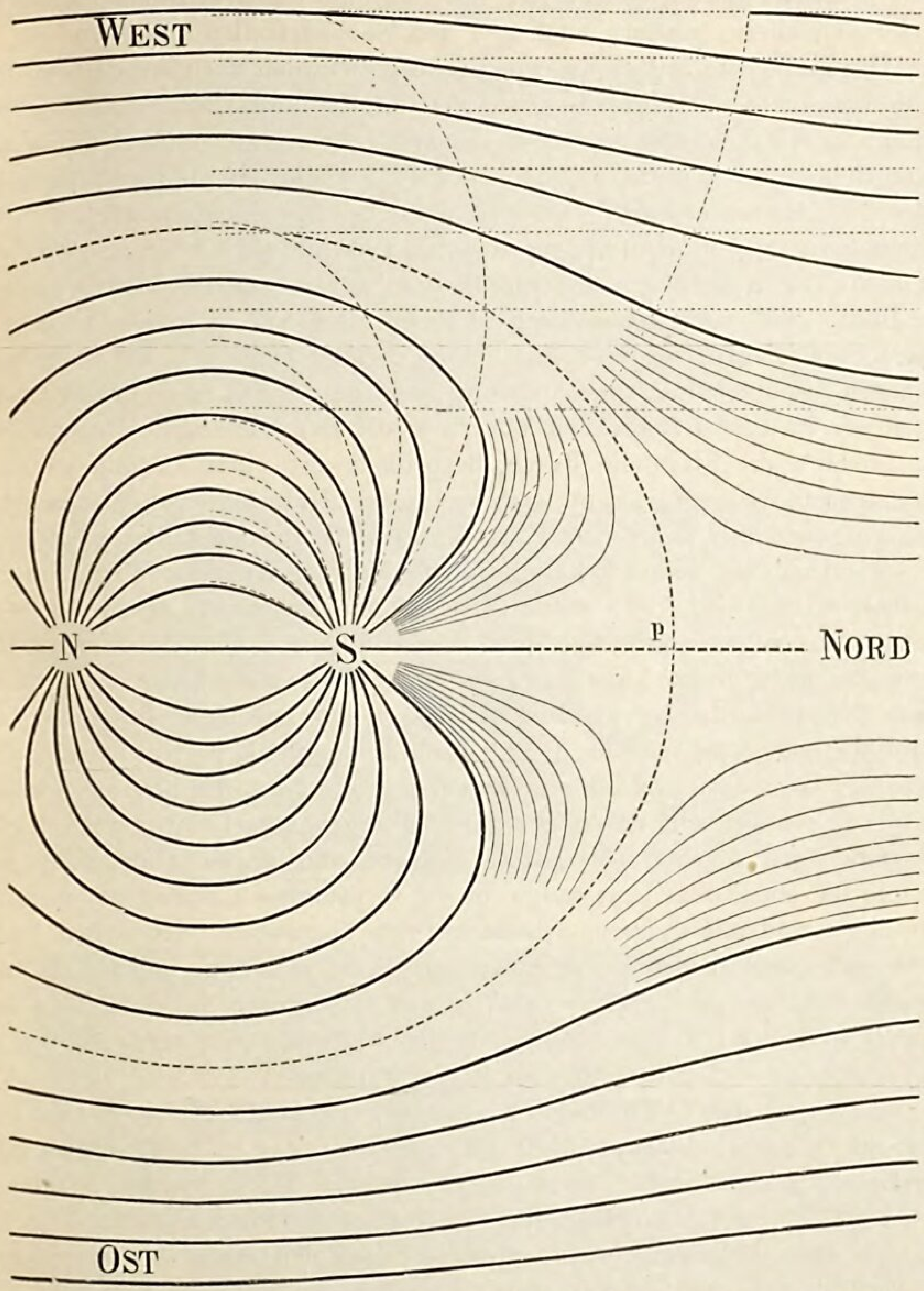
Die Kraftlinie, welche in der Richtung der Stabaxe ausgeht, geht allerdings durch diesen Punkt hindurch. Allein die Kraft selbst erlischt im Momente des Durchgangs und verkehrt ihre Richtung. Dasselbe geschieht längs der gestrichelten Curve. Auch hier zeigt der grosse Abstand der benachbarten Kraftlinien (obwohl neun Zwischencurven auf

*) Man braucht also nur das zweite (oberste) Pausepapier zu wechseln.

**) Man nennt P einen mehrfachen Punkt, in ihm schneiden sich zwei Niveaucurven, die wir hier nicht mit gezeichnet haben.

jeder Seite der gestrichelten Curve eingeschaltet sind), dass auch in der Nachbarschaft herum die Intensität des Feldes sehr gering ist. Auch an dieser Stelle wird daher eine Magnetnadel astatisch. Eine

Fig. 76.



gleiche Stelle findet sich natürlich symmetrisch gegenüber dem anderen Pole. Auf dieser Art der Astasirung beruht die später zu besprechende Anwendung der Magnetstäbe zur Steigerung der Empfindlichkeit der Galvanometer nach Hauy und Du Bois Reymond.

35 **Experimentelle Darstellung und Fixirung der Kraftlinien.** Die Kraftlinien wirklicher Magnete unterscheiden sich von den im vorausgegangenen Paragraphen beschriebenen nur wenig. Den Hauptunterschied macht der Umstand, dass die entgegengesetzten Magnetismen nicht in zwei Punkten concentrirt sind, weshalb die Kraftlinien nicht von zwei Polen allein, sondern auch von den Nachbarstellen ausgehen.

Das einfachste Mittel, die wirklichen Kraftlinien nach ihrer Richtung, wenn auch nicht nach ihrer quantitativen Vertheilung, sichtbar zu machen, besteht in der Anwendung feinen Eisenpulvers. Man verfährt dabei am besten folgendermaassen. Auf den Magnet legt man ein steifes Papierblatt (oder auch eine Glasplatte), bestreut dasselbe aus einem Haarsiebe recht gleichmässig und dünn mit dem feinsten Eisenpulver (*limatura ferri alcoholisata* der Apotheken) und klopft dann mit einem Stäbchen leise auf das Blatt. Sofort entstehen die Kraftlinien. Um sie zu fixiren, sind verschiedene Methoden vorgeschlagen worden. Man kann z. B. die Eisenfeile vorher mit weingeistiger Fuchsinlösung imprägniren und nachher die Kraftlinien mit Weingeist besprühen, oder, was die zweckmässigste Methode zu sein scheint, die Eisenfeile durch Besprühen mit einer Lösung weissen Schellacks fixiren. Man kann auch zuvor eine Unterlage von Wachs oder Paraffin geben und diese nach Entstehung der Figuren schmelzen, so dass die Eisentheilchen beim Erkalten fixirt werden. Auf der Wiener elektrischen Ausstellung 1883 waren sehr schöne Präparate dieser Art von Hauk ausgestellt, bei welchen auch die senkrecht in die Höhe ragenden Eisenbüschel in dieser Lage fixirt waren. Sehr schöne Bilder erhält man durch Benutzung lichtempfindlichen Papiers, das zur Herstellung der bekannten blauen Lichtpausen dient. Endlich empfiehlt E. Gerland*) die Fixirung auf Gyps. Zu diesem Zwecke werden die Figuren auf einer Glasplatte erzeugt, mit letzterer vorsichtig abgehoben, mit einer frisch gegossenen noch weichen Gypsplatte bedeckt und durch Andrücken der Glasplatten nach dem Umwenden in die Gypsmasse eingebettet, endlich getrocknet und mit weissem Schellackfirniss überzogen. Ich selbst habe recht gelungene Abdrücke in einfacher Weise erhalten, indem ich mit Kleister bestrichenes Papier vorsichtig auf die Figuren auflegte, leise andrückte und sofort abhob. Die erhaltenen Abdrücke sind rasch zu trocknen, damit sie nicht durch Rosten braun werden**).

Die Figuren 77, 78 und 79 sind auf erwähnte Weise durch Bestäuben mit Schellacklösung, die Figuren 80a bis 80e (a. S. 92) durch Abdrücke auf gekleistertem Papier fixiert worden. Dabei wurden erhalten:

Fig. 77 von den zugespitzten Polen eines Hufeisenmagnets, Fig 78 von den eben abgeschnittenen cylindrischen Polen eines sehr kräftigen Hufeisenmagnets, Fig. 79 von einem stabförmigen Magnete, Fig. 80a bis

*) Zeitschr. f. Elektrotechnik III, 694.

**) Schöne magnetische Curvenbilder zur Projection erhält man, indem man die Curven auf empfindlichen Trockenplatten erzeugt und dieselben dann belichtet, hervorruft und fixirt.

80 e von einem System zweier stabförmigen Magnete in fünf verschiedenen gegenseitigen Stellungen. Auf diesen Figuren sind die neutralen Punkte mit p bezeichnet.

Nach dieser Methode erhält man aber nur die Kraftlinien in der Nähe des Magnetes; in grösserer Entfernung reicht die Intensität des

Fig. 77.

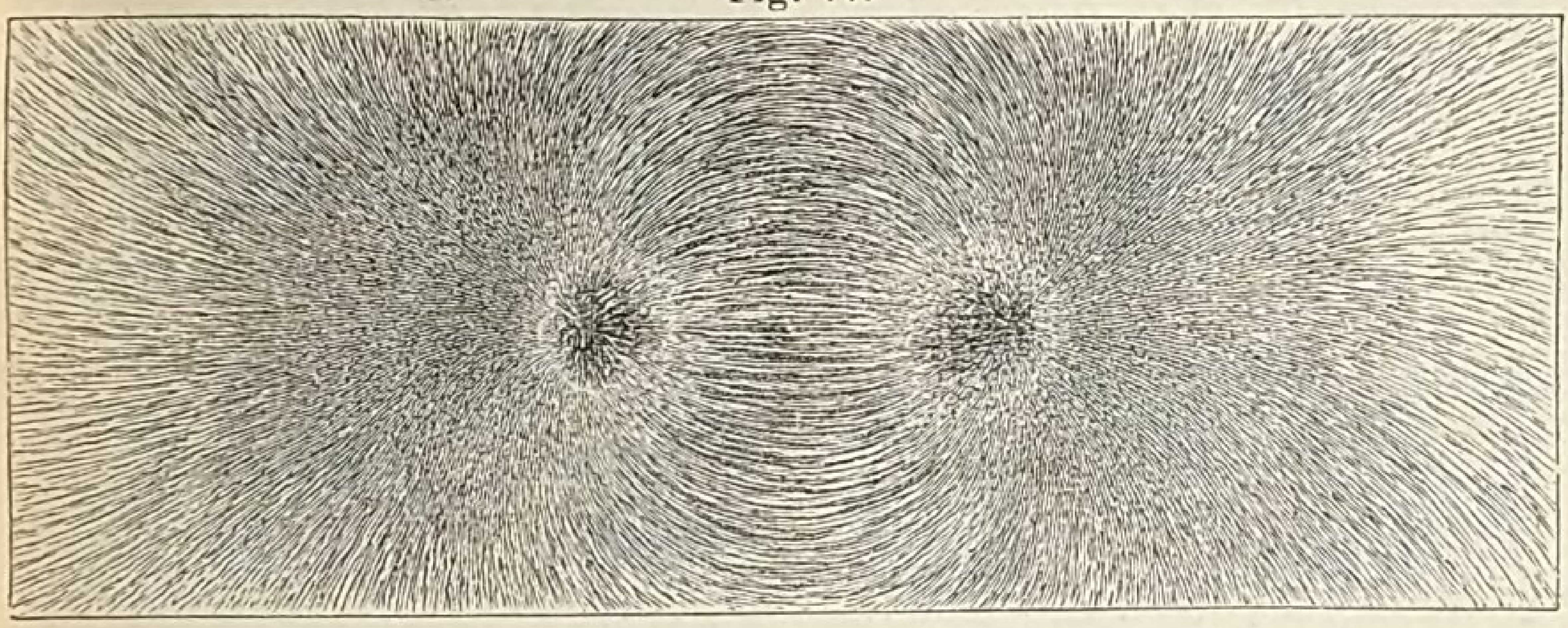


Fig. 78.

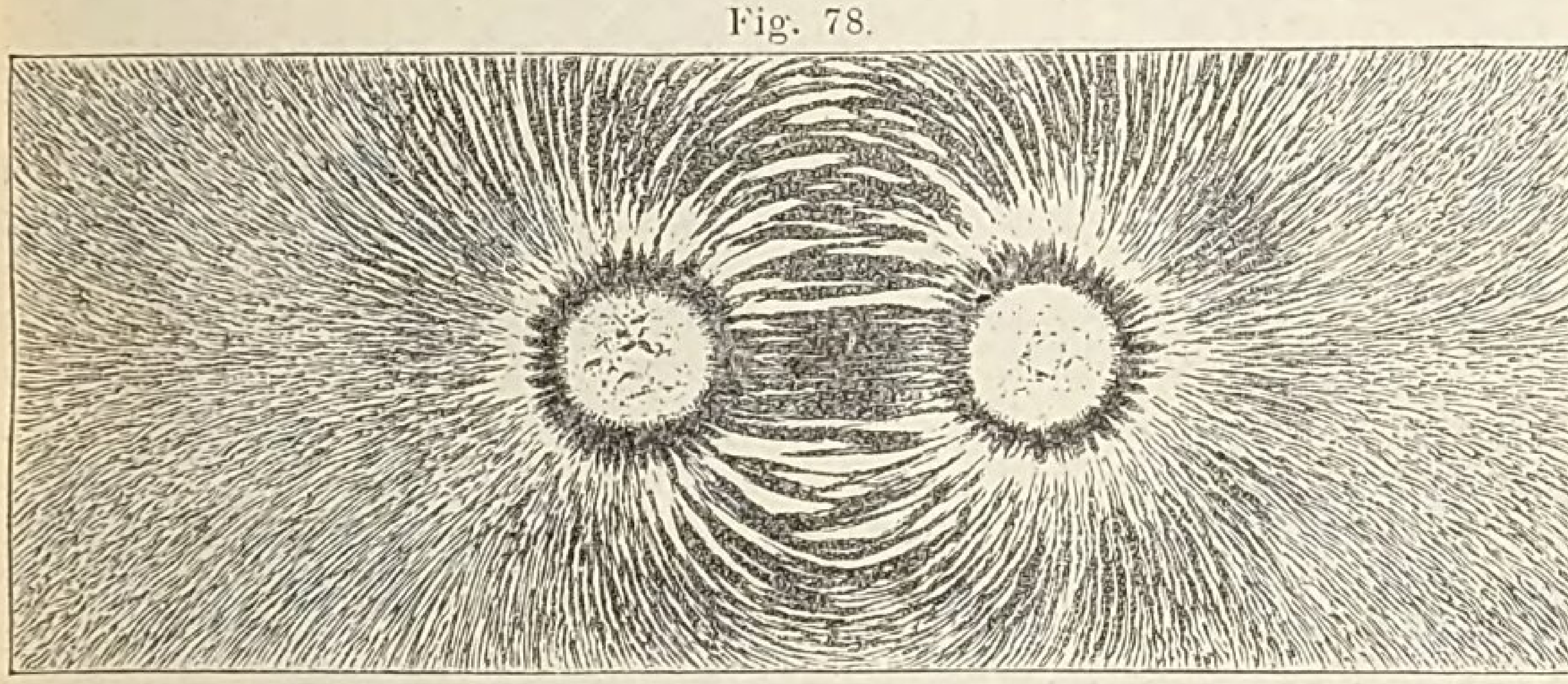
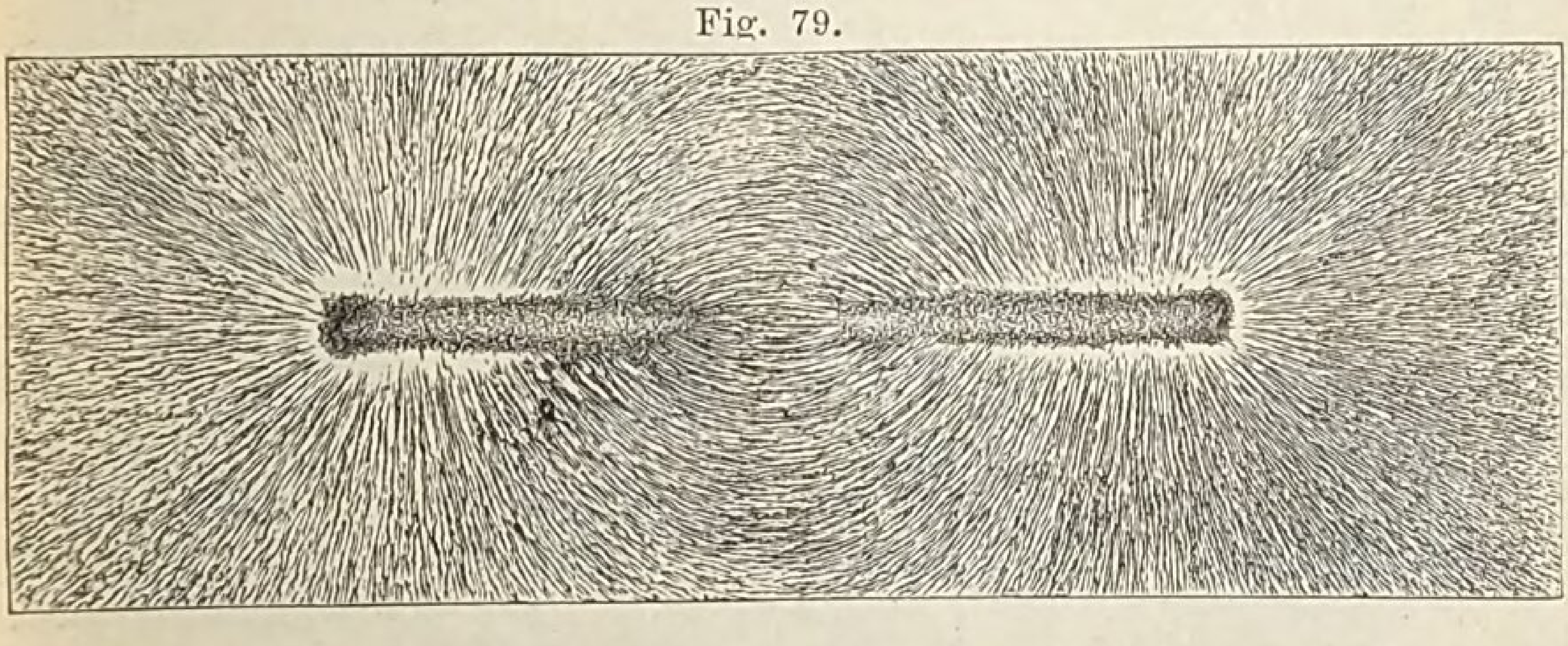


Fig. 79.



magnetischen Feldes nicht hin, um die Eisentheilchen zu orientiren. Man bedient sich dann einer Magnetnadel, welche auf eine sehr niedere Spitze gestellt ist und die man auf der Zeichnungsebene nach und nach in solche Positionen bringt, dass der eine Pol bei der nächsten Stellung

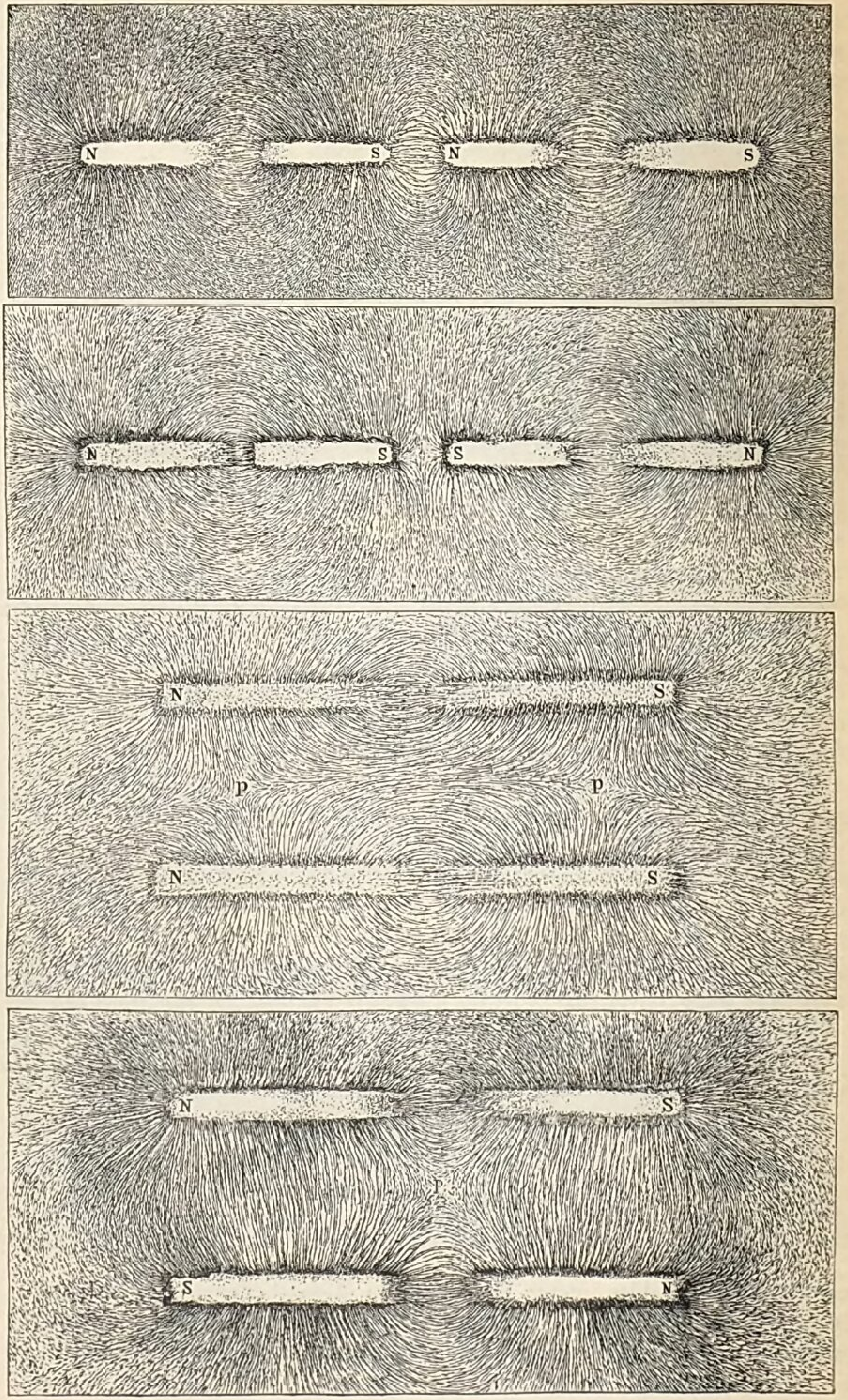
Fig. 80 a bis d.

a.

b.

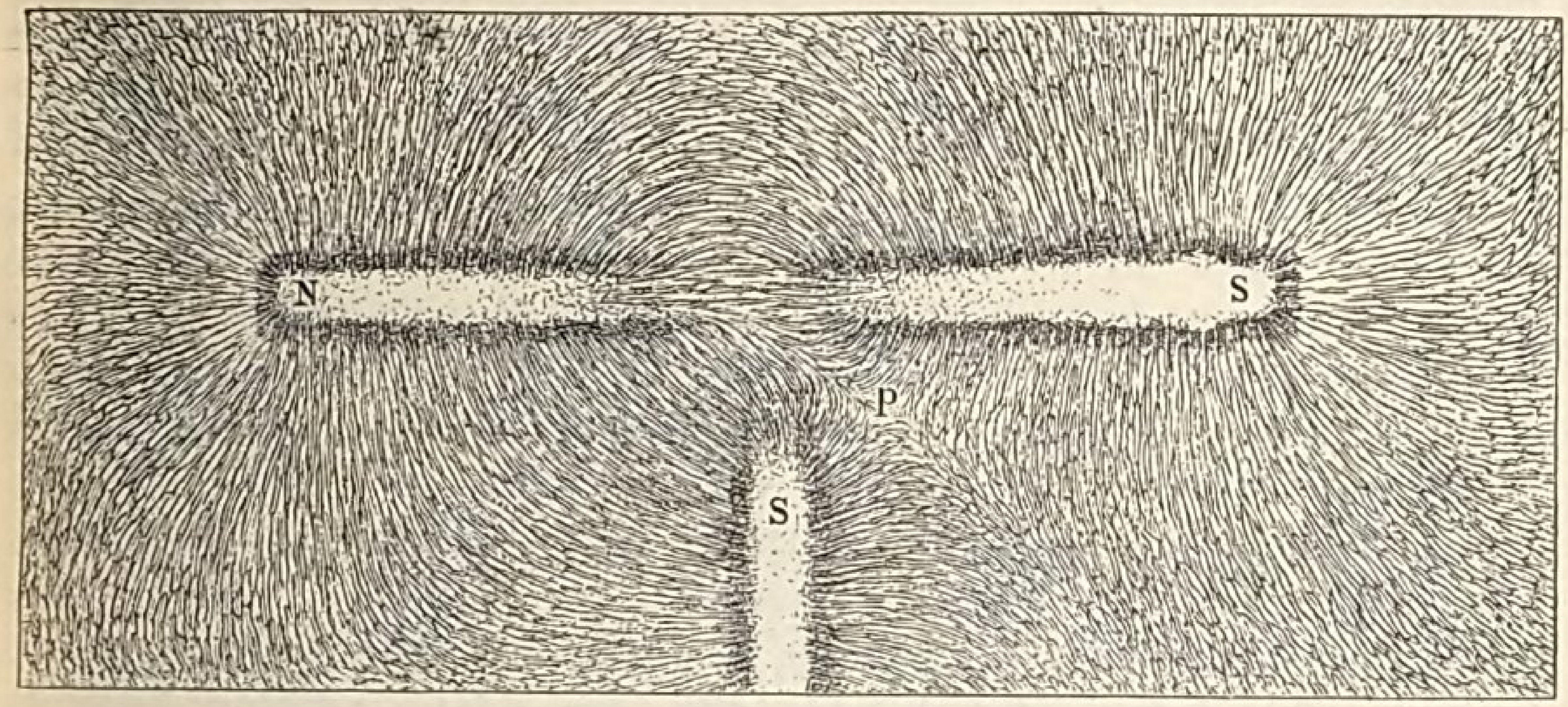
c.

d.



über den Punkt zu stehen kommt, über welchem bei der vorausgegangenen Stellung der andere Pol gestanden ist. Je nachdem die Kraftlinien an der betreffenden Stelle mehr oder weniger gekrümmt sind, verwendet

Fig. 80 e.

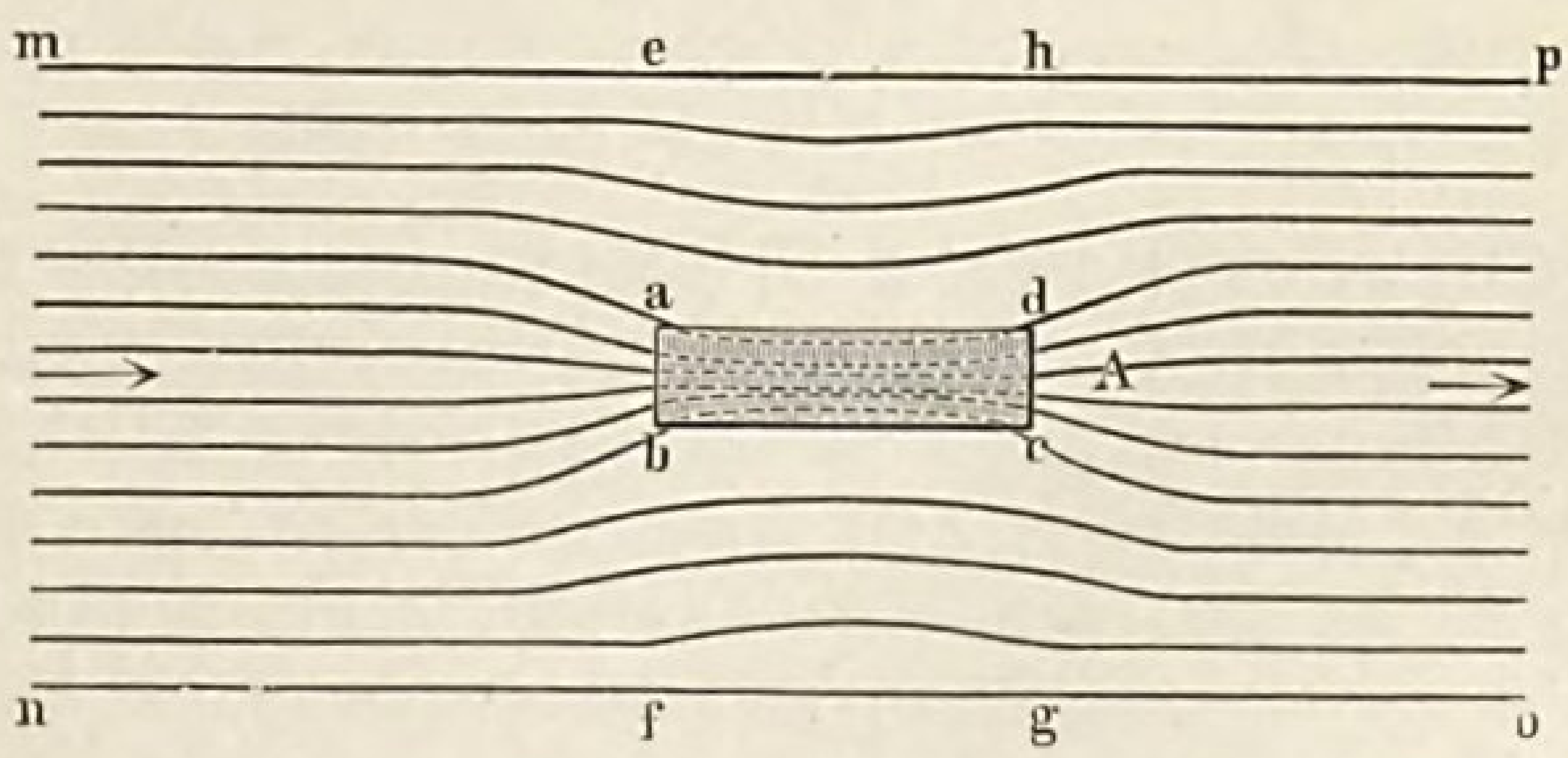


man eine kürzere oder längere Nadel. Die erwähnten Punkte werden angezeichnet und durch eine Curve verbunden. Auf diese Weise erhält man leicht genügend genaue Zeichnungen, um die im vorangegangenen Paragraphen besprochenen Fälle experimentell zu bestätigen.

Verhalten des weichen Eisens im magnetischen Felde; Inductionscoëfficient, magnetische Schirmwirkung. 36 In den §§. 3 und 22 wurde bereits mitgetheilt, dass weiches Eisen in der Nähe eines Magneten, sowie unter dem Einflusse des Erdmagnetismus magnetisch werde. Es ist daher vorauszusehen, dass ein Stück Eisen auf die Kraftlinien des magnetischen Feldes, in dem es sich befindet, eine ablenkende Wirkung ausüben werde, analog jener Wirkung, die ein Magnet ausübt, welcher seinen Nordpol dem Norden zukehrend mit seiner Axe im magnetischen Meridian liegt. Das weiche Eisen wirkt also anziehend auf die Kraftlinien und veranlasst diejenigen derselben, welche sonst in der Nachbarschaft vorbeigehen würden, ihren Verlauf durch die Eisenmasse hindurch zu nehmen. Die Fig. 81 (a. f. S.) giebt eine ungefähre Darstellung dieses Verhaltens. Dieselbe ist als Durchschnittszeichnung (nicht als die eines Rotationskörpers) aufzufassen, daher die Kraftlinien des homogenen Feldes als gleichweit abstehende Parallelen erscheinen. Das Eisenstück *abcd*, welches bei geradem Verlaufe nur zwei Kraftlinien aufnehmen würde, nimmt hier sechs solcher Linien auf und veranlasst noch weitere Nachbarlinien, sich anzunähern. Hierdurch wird die Intensität des Feldes vor und hinter dem Eisenstück erhöht, dagegen an den Seiten desselben vermindert. Dieses Verlaufen der Kraftlinien hat nun eine grosse Analogie mit dem Strömen des Wassers, der Wärme und der Elektricität. Wenn man in einen Canal mit fliessendem Wasser eine Scheidewand einfügt, welche parallel der Strömung verläuft, so wird zu-

nächst die Vertheilung des Wassers nicht geändert; es fliesst mit derselben Geschwindigkeit wie vorhin durch jeden Theil eine seinem Querschnitte entsprechende Wassermasse. Wenn man aber eine Abtheilung des Canals mit Hindernissen ausstattet, welche die Bewegung des Wassers daselbst verlangsamen, so wird dafür eine grössere Menge Wasser, als früher, durch die andere Abtheilung des Canals gedrängt. Die Wassermenge vertheilt sich nach dem Leitungsvermögen. Denken wir uns jetzt *mnop*, Fig. 81, als Canal, welcher überall mit Schilf durchwachsen ist*), so dass dadurch das Wasser in seinem Laufe verlangsamt wird; nur in der Mitte sei ein Raum *abcd* vom Schilfe gereinigt. Die Folge davon wird sein, dass durch den Querschnitt *ab* eine relativ grössere Wassermenge eintritt, als daneben passirt. Offenbar müssen dadurch die Wasserfäden schon vorher von der geraden Richtung abgelenkt und gegen die Mündung *ab* gerichtet werden. Ebenso müssen sich die Wasserfäden nach Passirung des Querschnittes *cd* wieder ausbreiten. Die Analogie mit der Wärmeströmung ist ganz dieselbe. Denken wir uns den Querschnitt *mn* auf höherer Temperatur, als der Querschnitt *po* besitzt. Zwischen beiden befinde sich der relativ schlecht leitende

Fig. 81.



Körper *mnop*, der nur innerhalb des Raumes *abcd* einen guten Wärmeleiter enthalte. Wir könnten uns z. B. vorstellen, dass ein Stück Holz ein Metallstück eingeschlossen enthalte. Auch in diesem Falle vertheilt sich der Wärmestrom, der von *mn* nach *op* fliesst, auf gleiche Querschnitte im Verhältniss der Leitungsfähigkeit. Das Metallstück wird die Wärme viel schneller hindurchlassen und deshalb auch mehr Zuströmen von Wärme am Eingange veranlassen. Endlich ist es ebenso beim elektrischen Strome, wie wir weiter unten hören werden. Durch die besprochene Analogie darf man sich aber nicht verführen lassen, in den Kraftlinien etwas Strömendes anzunehmen. Wenn wir nach Faraday uns des Ausdruckes bedienen, das weiche Eisen habe viel grössere Permeabilität für die Kraftlinien als die Luft und die übrigen Körper, oder die Permeabilität des harten Gusseisens oder Stahls sei etwas geringer als die des

*) Dieser treffende Vergleich rührt, so viel wir wissen, von E. Lecher her.

weichen Eisens, so wollen wir damit nur über die relative Fähigkeit des Eisens und des Stahles, durch Influenz (Induction) magnetisch zu werden, etwas aussagen. Den numerischen Ausdruck findet diese Eigenschaft durch den sogenannten Inductionscoëfficienten (Magnetisirungscoëfficienten) k, unter welchem man das magnetische Moment m versteht, das die Volumeinheit des Materials durch die magnetisirende Kraft $f = 1$ annimmt. Innerhalb gewisser Grenzen ist $k = \frac{m}{f}$ constant, im Allgemeinen ist jedoch k nicht constant, sondern abhängig von f und von der Temperatur.

Je nach der Form der Eisenmasse kann die Einwirkung der Eisenmasse auf den Verlauf der Kraftlinien eine sehr mannigfaltige sein und

Fig. 82.

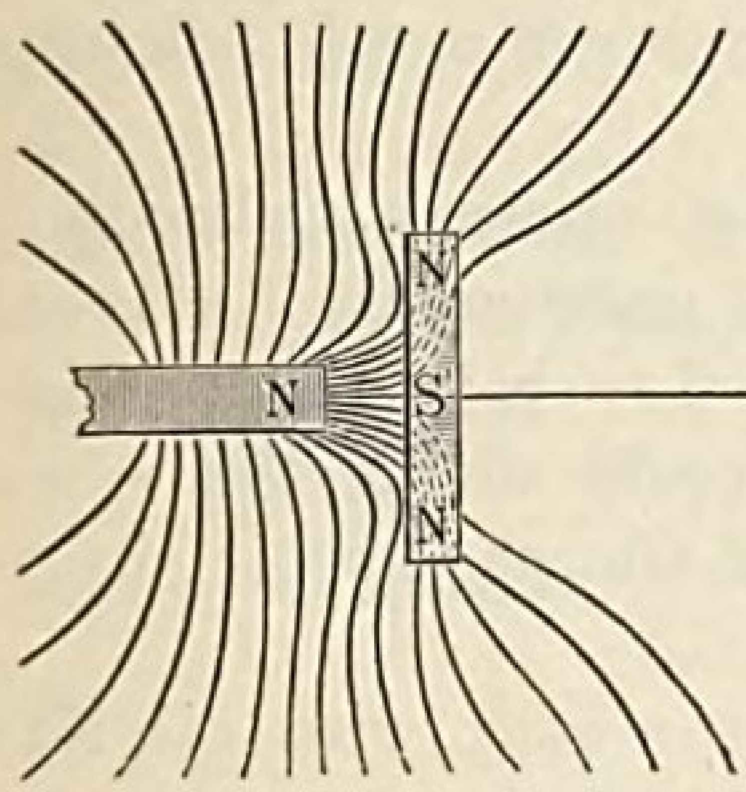
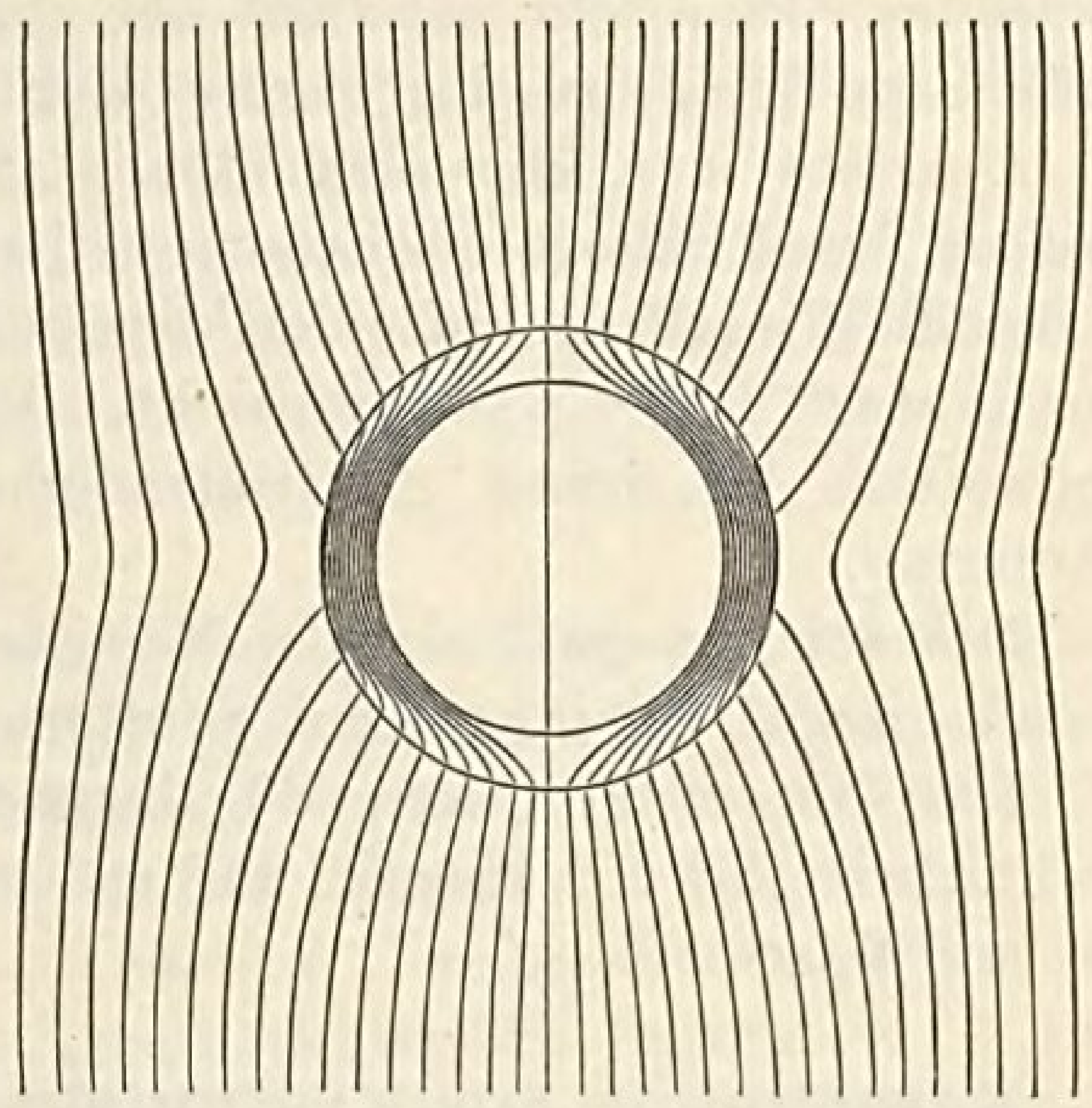


Fig. 83.



es kann durch das Eisen die Fernwirkung eines Magnets auf einen Punkt bald vermehrt, bald vermindert werden. So z. B. wird sicherlich bei der Anordnung in Fig. 81 die Fernwirkung des Poles, von dem die Kraftlinien ausgehen, auf den Punkt A durch das dazwischen gelegte Eisenstück $abcd$ verstärkt werden. Fig. 82 stellt einen Fall dar, wo das Umgekehrte der Fall ist. Die von N ausgehenden Kraftlinien dringen in das querliegende Stück weichen Eisens ein und verlassen dasselbe grösstentheils auf dem angezeichneten Wege durch seine Enden. In der Mitte entsteht durch Influenz der Südpol S, folglich an den Enden je ein Nordpol N', N'. Dass die Kraftlinien wirklich diese Richtungen einschlagen, davon kann man sich direct überzeugen, indem man über einem solchen System nach der im vorigen Paragraphen beschriebenen Methode mittelst Eisenfeile Kraftlinien erzeugt. Nur die in der Verlängerung der Magnetaxe senkrecht eintretenden Kraftlinien gehen in der Richtung nach A, die Nachbarlinien werden weit weg abgelenkt. Man kann daher sagen, der Punkt A werde durch das dazwischen liegende Eisenstück vor der magnetischen Einwirkung des Pols N grösstentheils geschützt. Diese Thatsache wird als magnetische Schirmwirkung bezeichnet. Man sagt auch, der

Punkt A befinde sich im magnetischen Schatten. Setzt man auf A eine kleine Magnetnadel, welche für sich allein senkrecht auf NA sich einstellen würde, so wird dieselbe viel stärker durch den Pol N abgelenkt, wenn man das Eisenstück entfernt, als wenn man es dazwischen stellt.

Als ein besonders wichtiges Beispiel magnetischer Schirmwirkung mag jene eines Hohlcylinders, Fig. 83 (a. v. S.), dienen. Diese Figur ist nach den Berechnungen von J. Stefan*) von Schilling**) gezeichnet. Die parallelen, in einer auf der Axe des Hohlcylinders senkrechten Ebene verlaufenden Kraftlinien werden gegen denselben hin abgelenkt. Ein grosser Theil derselben tritt in das Eisen ein und von diesen verläuft der grösste Theil innerhalb der Eisenmasse. Nur die mittlere, gegen die Axe gerichtete Kraftlinie und die in ihrer unmittelbaren Nachbarschaft befindlichen (in der Figur nicht gezeichneten) durchsetzen den Hohlraum. Eine sehr nahe mit der obigen übereinstimmende Zeichnung erhält Schilling für eine eiserne Hohlkugel.

Umgiebt man eine Magnetnadel mit einem eisernen Cylinder, so wird sie dem Einflusse des Erdmagnetismus zum grössten Theil entzogen, so dass die Richtkraft auf einen kleinen Bruchtheil — bei einem Versuche von Stefan auf $^1/_6$ — herabsinkt. Darauf beruht die Methode einer theilweisen Astasirung der Galvanometernadel durch einen eisernen Schutzring.

Bei dem Thomson'schen Marinegalvanometer wird die Nadel in eine eiserne Hohlkugel mit Fenstern eingeschlossen.

Das durch die Figur 83 dargestellte Verhalten hat die grösste Wichtigkeit für die Theorie der später zu besprechenden dynamoelektrischen Maschine.

37 **Berechnung der Kraftwirkung eines Magnetstabes auf eine Magnetnadel in den beiden Hauptlagen.** Die Kraftwirkung eines isolirten Magnetpoles auf einen anderen ist, wie oben gelehrt wurde, verkehrt proportional dem Quadrate der Entfernung. Wir haben nun zu zeigen, dass die Kraftwirkung eines Magnetstabes auf einen Pol näherungsweise verkehrt proportional der dritten Potenz der Entfernung sei.

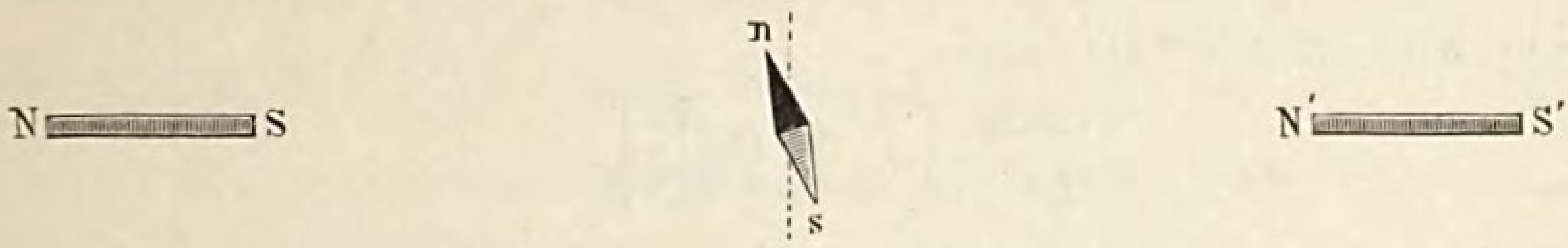
Gauss hat diesen Gegenstand ganz allgemein entwickelt und Formeln gegeben, nach welchen sich die Einwirkung eines Magnetstabes auf einen Pol, sowie auf einen zweiten Magnet für jede beliebige gegenseitige Lage berechnen lässt. Wir könnten diese Aufgabe auch mittelst der Kraftliniensysteme lösen; hier wollen wir aber den Weg der Rechnung einschlagen. Dabei werden wir uns überdies auf zwei Hauptfälle beschränken, welche wir nach Gauss als erste und zweite Hauptlage bezeichnen.

*) Wien. Akad. Ber., 85, 2. Abth. 613 (1882).
**) Zeitschrift f. Elektrotechnik III, 388.

Ein Magnetstab und eine nur um eine verticale Axe drehbare Magnetnadel sollen sich in derselben Horizontalebene befinden.

Als „Erste Hauptlage“ bezeichnen wir dann nach Gauss diejenige (in Fig 84 dargestellte), bei welcher der Magnetstab rechtwinkelig zum magnetischen Meridian steht und gegen den Drehungspunkt der Nadel gerichtet ist.

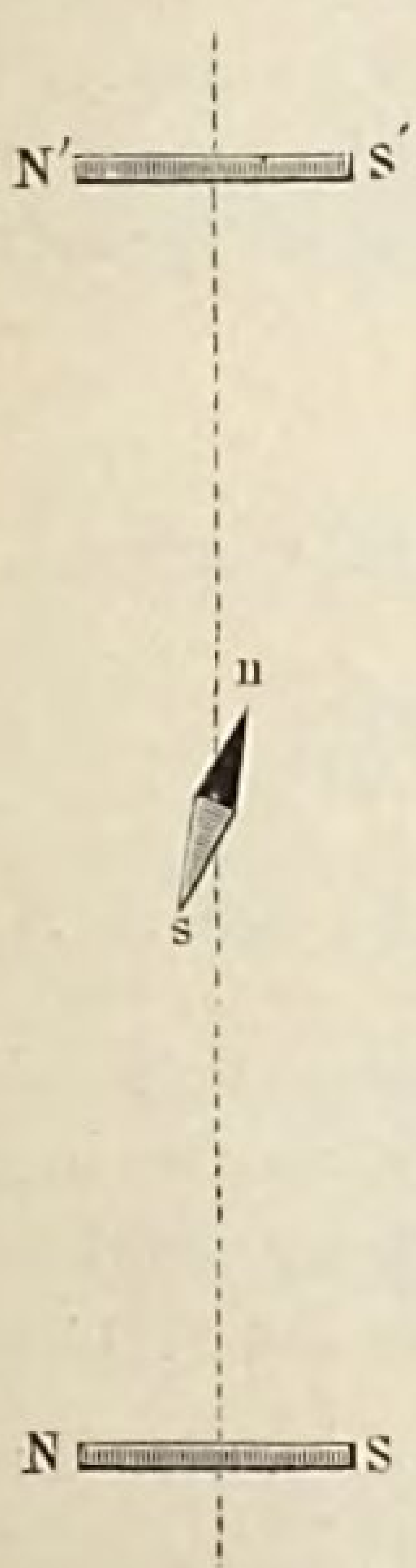
Fig. 84.
Erste Hauptlage.



Als „Zweite Hauptlage“, Fig. 85, bezeichnen wir jene, bei welcher der Stab ebenfalls senkrecht auf dem magnetischen Meridian, jedoch so gestellt ist, dass die durch den Drehungspunkt der Nadel gezogene magnetische Meridianlinie seine Mitte trifft.

Bei beiden Hauptlagen sind noch vier specielle Fälle zu unterscheiden, je nachdem der Stab die Lage NS oder die Lage $N'S'$ hat oder dieselben Lagen mit entgegengesetzten Polen einnimmt, wobei dann die Ablenkung der Nadel eine entgegengesetzte wird.

Fig. 85.
Zweite Hauptlage.



Wir setzen voraus, dass Magnetstab und Magnetnadel symmetrisch und regelmässig magnetisirt seien, und dass die Entfernung ihrer Mittelpunkte gross sei im Verhältniss zu den Längen der Magnete.

Der Magnetstab NS habe die Polstärke m und $-m$, die Magnetnadel ns die Polstärken $+m'$ und $-m'$, der Abstand der Stabmitte von der Nadelmitte betrage L, die Länge des Magnetstabes l, der Magnetnadel l'.

Wir untersuchen zunächst die Fernwirkung auf den Pol s, Fig. 86 (a. f. S.). Der nähere Pol wirkt mit der Kraft

$$\frac{mm'}{(L - {}^1\!/_2\, l)^2},$$

der entferntere mit der Kraft

$$-\frac{mm'}{(L + {}^1\!/_2\, l)^2};$$

die resultirende Fernwirkung f_1 ist demnach gegeben durch den Ausdruck

$$f_1 = mm'\left[\frac{1}{(L - {}^1\!/_2\, l)^2} - \frac{1}{(L + {}^1\!/_2\, l)^2}\right]$$
$$= mm'\left[\left(L - \frac{l}{2}\right)^{-2} - \left(L + \frac{l}{2}\right)^{-2}\right].$$

Bayerische Staatsbibliothek München

Entwickelt man die beiden Binome nach dem binomischen Lehrsatze, so kommt:

$$\left(L - \frac{l}{2}\right)^{-2} = L^{-2} + 2L^{-3}\frac{l}{2} + 3L^{-4}\frac{l^2}{4} + 4L^{-5}\frac{l^3}{8} + \cdots$$

$$\left(L + \frac{l}{2}\right)^{-2} = L^{-2} - 2L^{-3}\frac{l}{2} + 3L^{-4}\frac{l^2}{4} - 4L^{-5}\frac{l^3}{8} + \cdots$$

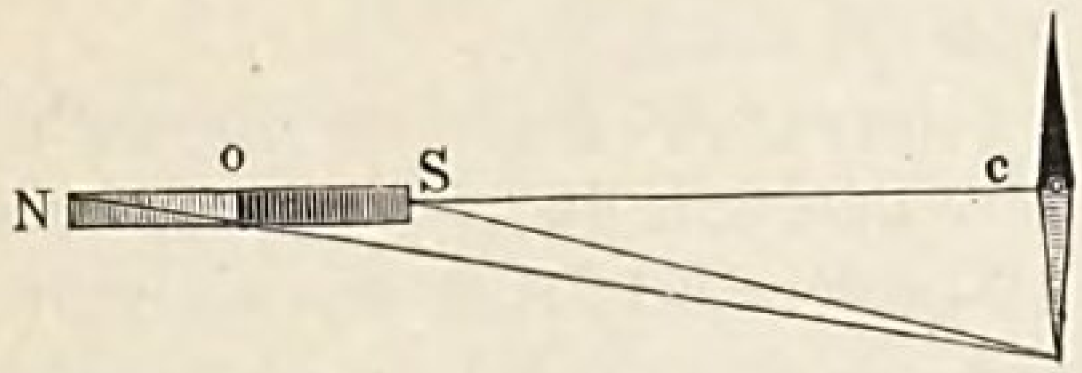
daher wird (genähert):

$$f_1 = \frac{2\,l\,m\,m'}{L^3}\left[1 + {}^1/_2\frac{l^2}{L^2}\right],$$

oder, indem wir für lm den Buchstaben M setzen:

$$f_1 = \frac{2\,M\,m'}{L^3}\left[1 + {}^1/_2\frac{l^2}{L^2}\right] \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

Fig. 86.



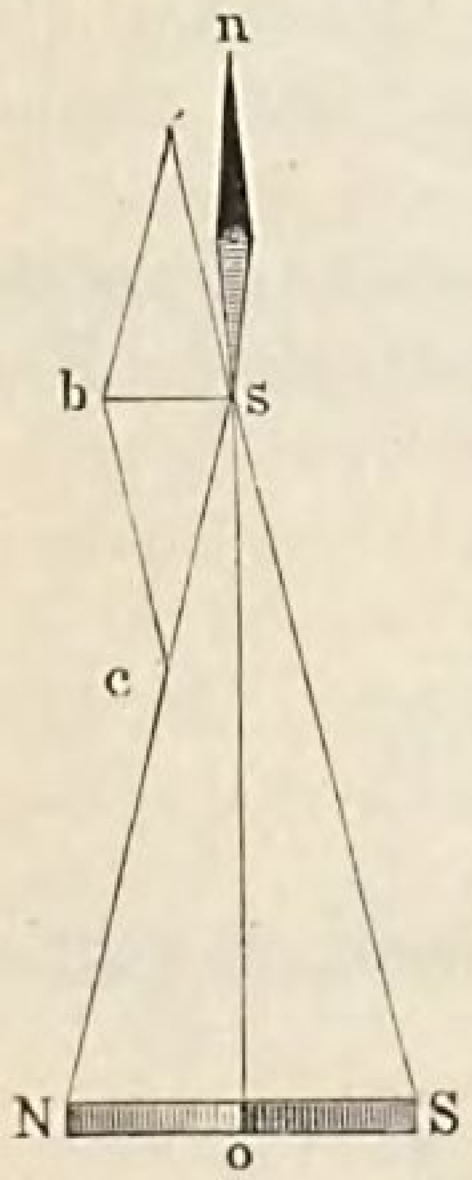
In der zweiten Hauptlage, Fig. 87, stösst der Pol S den Pol s mit der Kraft

$$\frac{m\,m'}{L^2 + {}^1/_4\,l^2}$$

ab, der Pol N zieht ihn ebenso stark an. Beide Kräfte setzen sich nach den Regeln des Kräfteparallelogramms zu einer Resultirenden f_2 zusammen, welche nach Richtung und Grösse durch die Strecke sb gegeben ist, wenn wir mit den Strecken sa und sc die Componenten darstellen. Aus der Proportion

$$Ss : SN = sa : sb$$

Fig. 87.



folgt nach Untersetzung der betreffenden Werthe:

$$f_2 = \frac{m\,m'\,l}{(L^2 + {}^1/_4\,l^2)\sqrt{L^2 + {}^1/_4\,l^2}}$$

$$= \frac{M\,m'}{(L^2 + {}^1/_4\,l^2)^{3/2}} = \frac{M\,m'}{L^3}\left(1 - {}^3/_8\frac{l^2}{L^2}\right) \quad . \quad . \quad 2)$$

Aus der Fernwirkung auf die einzelnen Pole erhalten wir nun sofort die Drehungsmomente, welche in den beiden Hauptlagen auf die Magnetnadel ausgeübt werden durch Multiplication der Ausdrücke für f_1 und f_2 mit 2 und mit der Länge des Hebelarms $\frac{l'}{2}$, also durch Multiplication mit l'. Indem wir hierbei für das magnetische Moment der Nadel $m'l'$ den Buchstaben M' setzen, erhalten wir: das Drehungsmoment, welches ein Stab vom magnetischen Momente M auf eine Magnetnadel vom Momente M' in der Entfernung L ausübt, beträgt in der ersten Hauptlage:

$$\frac{2\,MM'}{L^3}\left(1 + \tfrac{1}{2}\frac{l^2}{L^2}\right) \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

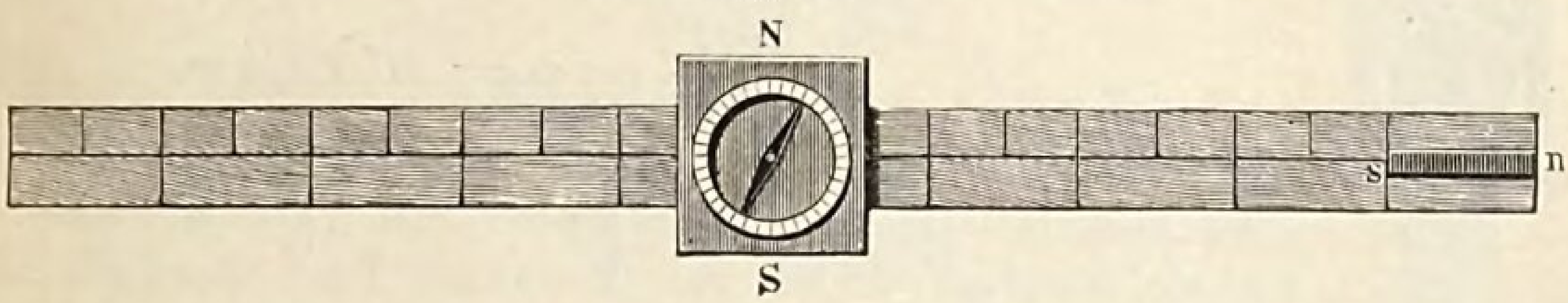
in der zweiten Hauptlage

$$\frac{MM'}{L^3}\left(1 - \tfrac{3}{8}\frac{l^2}{L^2}\right) \quad \ldots\ldots\ldots \quad 4)$$

Wenn l gegen L genügend klein ist, so gehen diese Ausdrücke über in die genäherten $\frac{2\,MM'}{L^3}$ für die erste und $\frac{MM'}{L^3}$ für die zweite Hauptlage. Das Drehungsmoment ist daher in der ersten Hauptlage doppelt so gross als in der zweiten.

Experimentelle Prüfung des Gesetzes über die Wirkung zweier Magnete auf einander. 38 Im vorigen Paragraphen wurde durch Rechnung gefunden, dass ein Magnetstab auf eine drehbare Magnetnadel ein Drehungsmoment ausübt, welches in der ersten Hauptlage näherungsweise durch $2\,\frac{MM'}{L^3}$, in der zweiten Hauptlage durch $\frac{MM'}{L^3}$ gegeben ist, wo M und M' die magnetischen Momente, L die Entfernung bedeuten.

Fig. 88.



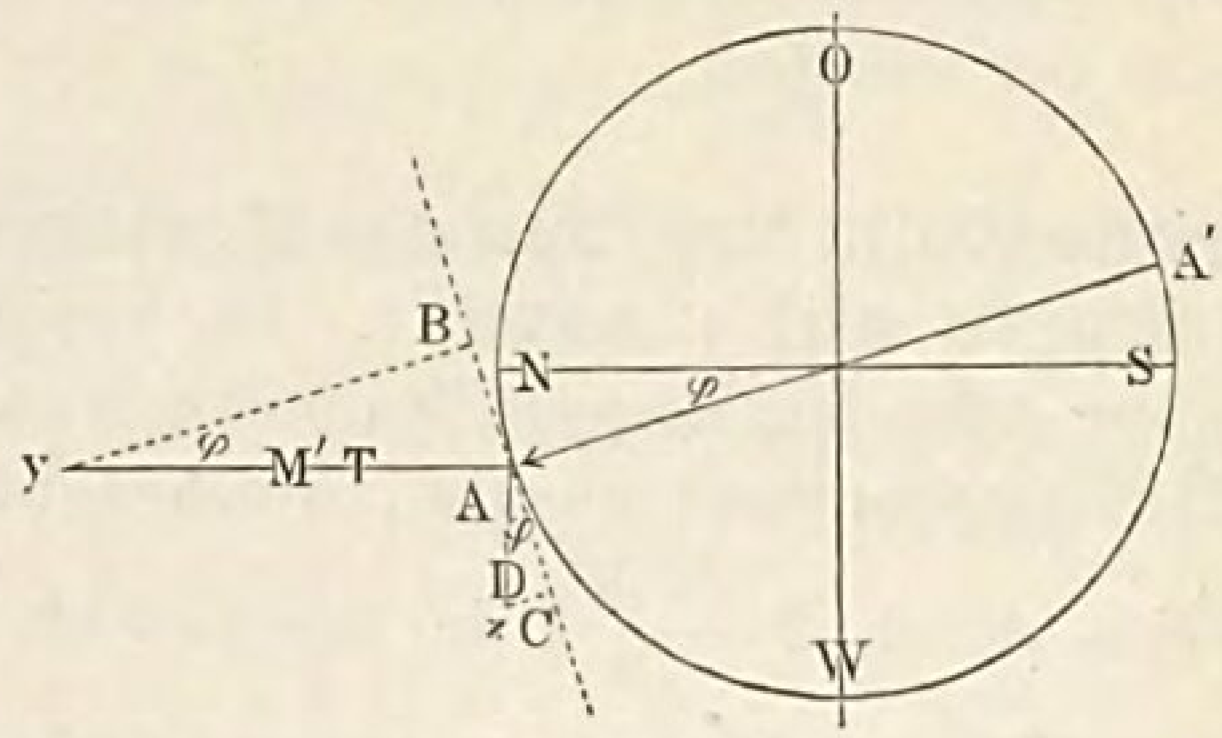
Gauss hat dieses Gesetz durch Versuche an seinem Magnetometer geprüft. Nach W. Weber kann man sich hierzu einer einfachen Bussole bedienen, an deren Gradeintheilung etwa noch zehntel Grade geschätzt werden können. Man versieht dieselbe mit einer kurzen Magnetnadel und befestigt quer darüber einen feinen Glasfaden, der als Zeiger dient. Diese Bussole wird auf die Mitte eines breiten, 1 m langen Maassstabes gesetzt, welcher eine Eintheilung in halbe Decimeter besitzt. Fig. 88 zeigt die Anordnung für die erste, Fig. 89 (a. f. S.) für die zweite Hauptlage. In der ersten liegt der Maassstab senkrecht, in der zweiten parallel zum magnetischen Meridian. Der Magnetstab, den man am bequemsten genau 10 cm lang wählt, wird in der angedeuteten Weise auf den Maassstab aufgelegt. Um eine etwaige Excentricität der Nadel gegen die Kreistheilung unschädlich zu machen, werden stets beide Nadelspitzen abgelesen; um etwaige unsymmetrische Magnetisirung des Stabes zu eliminiren, wird derselbe einmal mit dem Nordpol, dann einmal mit dem Südpol gegen die Nadel aufgelegt. Um endlich auch unsymmetrische Magnetisirung der Nadel unschädlich zu machen, legt man den Stab einmal östlich, dann westlich von der Bussole. Man erhält demgemäss acht

Ablenkungsablesungen für jede Entfernung, die man zu einem Mittel vereinigt. Es sei nun in Fig. 90 NS die ursprüngliche, AA' die um den Winkel φ abgelenkte Lage der Magnetnadel, deren magnetisches Moment $= M'$. Der Ablenkungsmagnet, dessen Moment $= M$, wirkt auf die Nadel drehend mit der Kraft D in der Richtung Ax in der Grösse $2\frac{MM'}{L^3}$. Der Erdmagnetismus T wirkt dagegen mit der Kraft $M'T$ in der Richtung Ay. Soll die Nadel ins Gleichgewicht kommen, so müssen

Fig. 89.



Fig. 90.



die Projectionen dieser Kräfte auf die Tangente einander gleich sein. Es muss also dann die Gleichung bestehen:

$$2\frac{MM'}{L^3}\cos\varphi = M'T\sin\varphi,$$

woraus folgt:

$$L^3 \tang \varphi = \frac{2M}{T} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

Für denselben Magnetstab und an demselben Orte der Erde wird daher, da sich T während des Versuches nicht merklich ändert, $\frac{2M}{T}$ eine constante Zahl sein, somit auch $L^3 \tang \varphi$.

Wir entnehmen nun zur Prüfung dieser Folgerung den Versuchen von W. Weber folgende Zahlen:

L	φ	$\tang \varphi$	$L^3 \tang \varphi$
45 cm	11° 24′ 0″	0,20163	18374
35 „	23° 28′ 50″	0,43440	18625
30 „	35° 17′ 25″	0,70779	19110

Wie man sieht, sind die Zahlen der letzten Columne nahe, aber nicht ganz constant, was seinen Grund darin hat, dass das Gesetz eben

nur ein angenähertes ist. Wir werden weiter unten zeigen, wie man unter Benutzung der genaueren Formel vorzugehen hat, um die hieraus hervorgehenden Fehler zu vermeiden. Für die zweite Hauptlage erhält man die Zahlen der letzten Columne halb so gross.

Bestimmung der horizontalen Componente des Erdmagnetismus nach absolutem Maasse; die Schwingungsversuche. 39 Die Definition dieser Componente und die Bedeutung des absoluten Maasses derselben haben wir bereits in den §§. 21 und 26 besprochen. Wir wiederholen kurz: Die horizontale Componente des Erdmagnetismus nach absolutem Maasse ist im Centimeter-Gramm-Secunden-System die nach Dynen gemessene Kraft, mit welcher der Erdmagnetismus einen Pol von der Stärke Eins in horizontaler Richtung zu bewegen sucht. Pol von der Stärke Eins ist jener, der einen ihm gleichen in 1 cm Abstand mit der Kraft von einer Dyne abstösst.

Bei der Wichtigkeit, welche die Kenntniss der Horizontalcomponente für den Physiker besitzt, wollen wir die Bestimmung derselben nach der Methode von Gauss ausführlich besprechen.

Im ersten Bande §. 67 haben wir für die Schwingungsdauer eines physischen Pendels die Formel

$$t = \pi \sqrt{\frac{k}{g\,G}}$$

abgeleitet, worin t die Schwingungsdauer, k das Trägheitsmoment, $g\,G$ das Drehungsmoment (in absolutem Maasse), π die Ludophische Zahl bedeuten. Wenden wir diese Formel auf einen Magnetstab an, der unter dem Einflusse des Erdmagnetismus um eine verticale Axe schwingt, so ist das Drehungsmoment desselben offenbar gleich $M\,T$, wenn wir mit M den Magnetismus, mit T die gesuchte Horizontalcomponente bezeichnen. Besteht nämlich der schwingende Magnet aus zwei Polen mit den Polstärken $+ m$ und $- m$ im Abstande l, so ist $\frac{l}{2}$ der Dreharm, an dem die Kraft $m\,T$ wirkt. Für beide Pole ist demnach das Drehungsmoment $= 2\,\frac{l\,m\,T}{2} = M\,T$, da $M = l\,m$ ist.

Setzt man diesen Werth des Drehungsmomentes in die Pendelformel, so kommt:

$$t = \pi \sqrt{\frac{k}{M\,T}},$$

woraus

$$M\,T = \frac{\pi^2 k}{t^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

Aus der Schlussformel im §. 38 folgt für die erste Hauptlage aus den Ablenkungsversuchen, die man mit demselben Magnetstabe an einer Magnetnadel anstellt:

$$\frac{M}{T} = \frac{L^3 \, tang \, \varphi}{2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

Durch Division von 1) durch 2) kommt dann:

$$T^2 = \frac{2 \pi^2 k}{t^2 L^3 \, tang \, \varphi}$$

$$T = \frac{\pi}{t} \sqrt{\frac{2 k}{L^3 \, tang \, \varphi}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

Die Methode zerfällt also in zwei Hauptoperationen; die eine, die Bestimmung des Productes MT, erfordert die Ausmittelung des Trägheitsmomentes k des Stabes und seiner Schwingungsdauer t; die andere, die Ermittelung des Quotienten $\frac{M}{T}$, hat die Ablenkung φ in dem Abstande L an einer Magnetnadel zu messen. Soll die Bestimmung einigermaassen genau sein, so ist noch auf einige Nebenumstände Rücksicht zu nehmen, die wir gleich besprechen werden.

I. Ermittelung von MT.

Dieselbe geschieht entweder mit dem Magnetometer von Gauss, oder mittelst eines einfacheren Apparates nach W. Weber, der in Fig. 91 abgebildet ist. Der genau prismatisch (oder cylindrisch) gearbeitete Magnetstab ist mittelst eines kleinen Messingöhrs an einem Bündel ungedrehter Coconfäden innerhalb eines Kästchens aufzuhängen. Das Stielchen, an dem die Fäden oben befestigt sind, lässt sich heben und senken, sowie um seine Axe drehen. Noch besser ist die Einrichtung, wenn das Stielchen mit einem Torsionskopf, d. h. mit einer Vorrichtung versehen ist, welche die Winkeldrehung des Stielchens zu messen gestattet (§. 18, Fig. 47, §. 24, Fig. 59). Bei genauen Arbeiten sollen die Schwingungen des Magnets mittelst Spiegel und Scala beobachtet werden. Will man keinen eigenen Spiegel anbringen, so kann man eine Endfläche des Magnetstabes selbst zu einem Spiegel schleifen lassen. Damit die Fäden vor dem Anhängen des Magnetes ganz aufgedreht werden, hängt man zuerst eine nicht magnetische Masse von gleichem Gewichte, wie der Magnet, an die Fäden und wartet die Ruhe ab. Man dreht dann das Stielchen, bis die Aufhängevorrichtung dieselbe Lage angenommen hat, welche sie später mit dem Magnet einnehmen wird. Nach Einhängung des Magnetstabes wird sodann seine Ruhelage aus den Umkehrpunkten ebenso bestimmt, wie wir dies im ersten Bande, S. 234, für die Ruhelage einer Wage beschrieben haben. Um dann die Schwingungsdauer t zu ermitteln, notirt man den Zeitmoment, in welchem die Ruhelage passirt wird, lässt eine Anzahl, z. B. n Schwingungen, vorübergehen und notirt wiederum die Zeit. Durch Division mit n erhält man t. Um recht genau zu verfahren, wird man viele, z. B. 100, Schwingungen zusammennehmen. Doch ist nicht nöthig, diese alle einzeln zu zählen; denn sobald man einen genäherten Werth der Schwingungsdauer t besitzt, genügt es, dass man

zwei Zeitmomente des Durchgangs durch die Ruhelage beobachtet. Das dazwischen liegende Zeitspatium, dividirt durch den genäherten Werth von t, giebt die Zahl n der Schwingungen. Das Zeitspatium, dividirt durch die auf eine ganze Zahl abgerundete Anzahl der Schwingungen, giebt dann einen genaueren Werth von t.

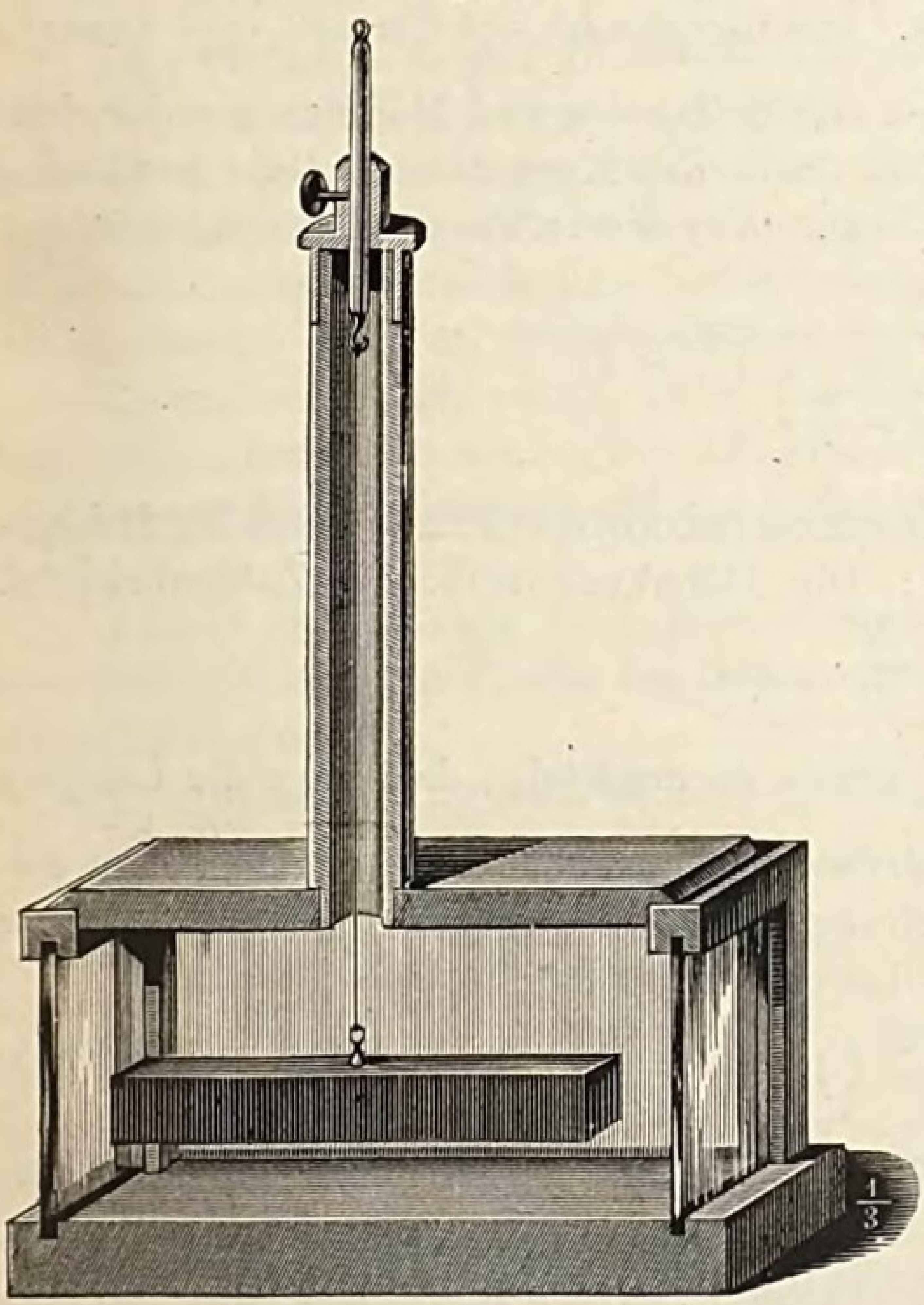
Dieser Werth von t ist nun auf unendlich kleine Bogen zu reduciren. Seite 196 des ersten Bandes haben wir mitgetheilt, dass die genaue Formel für die Schwingungsdauer eines Pendels

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left(1 + {}^1/_4\, sin^2 \frac{\alpha}{2} + \left(\frac{1.3}{2.4}\right)^2 sin^4 \frac{\alpha}{2} + \cdots\right)$$

sei; nur wenn α unendlich klein, ist die einfache Formel $t_o = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ richtig. Man findet daher:

$$t_o = t - \left({}^1/_4\, sin^2 \frac{\alpha}{2} + {}^5/_{64}\, sin^4 \frac{\alpha}{2}\right) t,$$

Fig. 91.



da die folgenden Glieder zu vernachlässigen sind. Noch bequemer ist die Anwendung der diesbezüglichen Correctionstabellen, z. B in Kohlrausch's prakt. Physik. Die Berechnung des Trägheitsmomentes k oder die experimentelle Ermittelung desselben haben wir bereits auf S. 308 und 310 des ersten Bandes besprochen. Wir wollen hier nur wiederholen, dass für ein rechtwinkeliges Parallelepiped von der Länge L, der Breite B und der Masse P, welches wie der Magnet in Fig. 91 schwingt, das Trägheitsmoment durch den Ausdruck

$$k = \frac{L^2 + B^2}{12} P$$

gegeben ist. Das Trägheitsmoment des kleinen Messingöhrs kann vernachlässigt werden. Wir hätten jetzt alle Grössen, um das Product $MT = \frac{\pi^2 k}{t}$ zu berechnen. Doch ist noch eine Correction anzubringen in Folge des

Umstandes, dass während des Schwingens der Faden etwas tordirt wird und daher neben dem Drehungsmoment des Erdmagnetismus noch jenes der Torsion zur Wirkung kommt. Das letztere ist genau, das erstere bei kleinen Winkeln sehr nahe dem Drehungswinkel proportional. Das Verhältniss beider Drehungsmomente wird Torsionsverhältniss genannt (§. 24) und folgendermaassen bestimmt.

Man giebt dem Stielchen oben eine Drehung um α Grade und beobachtet, um wie viel sich dadurch die Ruhelage ändert*). Diese Aenderung sei $= \varphi$, dann ist das Torsionsverhältniss $\theta = \frac{\varphi}{\alpha - \varphi}$. Wenn nämlich der Magnet um φ abgelenkt ist, so ist die Torsion nicht mehr $= \alpha$, sondern $\alpha - \varphi$. Der Versuch sagt nun, dass das durch die Torsion um $\alpha^0 - \varphi^0$ bewirkte Drehungsmoment dem durch den Magnetismus bei φ^0 bewirkten Drehungsmoment gleich sei. Bei den Schwingungsversuchen ist der Faden nicht künstlich tordirt, d. h. nur so viel, als die Ablenkung beträgt. Es verhält sich dann offenbar das durch die Torsion bewirkte Drehungsmoment zu dem durch den Erdmagnetismus bewirkten, wie $\frac{1}{\alpha - \varphi} : \frac{1}{\varphi}$ oder wie $\varphi : \alpha - \varphi$. Das direct nach der Formel $\frac{\pi^2 k}{t^2}$ berechnete Drehungsmoment, welches durch Torsion und Magnetismus bewirkt wurde, verhält sich also zu dem durch den Magnetismus allein bewirkten MT wie $\varphi + (\alpha - \varphi)$ zu $\alpha - \varphi$. Aus dieser Proportion folgt aber:

$$MT = \frac{\pi^2 k}{t^2\left(1 + \frac{\varphi}{\alpha - \varphi}\right)} = \frac{\pi^2 k}{t^2 (1 + \theta)} \quad \ldots\ldots \quad 4)$$

40 **Bestimmung der Horizontalcomponente des Erdmagnetismus.** Fortsetzung: Die Ablenkungsversuche; Zahlenbeispiel.

II. Ermittelung von $\frac{M}{T}$.

Um den Werth von $\frac{M}{T}$ genau zu ermitteln, darf man die Länge l des Magnets M nicht ganz vernachlässigen, sondern muss von dem genaueren Werthe für das Drehungsmoment Gebrauch machen, den wir im §. 37 unter 3) mitgetheilt haben. Derselbe lautete:

$$\frac{2 M M'}{L^3}\left(1 + {}^1/_2 \frac{l^2}{L^2}\right).$$

Unter Benutzung desselben wird dann die Gleichung 1) im §. 38 ersetzt durch die genauere:

$$L^3 \, tang \, \varphi = 2 \frac{M}{T}\left(1 + {}^1/_2 \frac{l^2}{L^2}\right).$$

*) Wenn das Stielchen keinen Torsionskreis besitzt, so führt man statt dessen den Magnetstab einmal ganz herum. In diesem Falle ist dann $\alpha = 360^0$.

Um $\frac{M}{T}$ zu berechnen, sollten wir also ausser L und φ auch noch die Länge l, d. i. den Abstand der Pole des Magnetstabes, genau kennen. Nun ist aber die genaue Lage der Pole nicht bekannt, da dieselben bei solchen Stäben nicht mit den Enden zusammenfallen. Man verfährt daher am genauesten in der Weise, dass man sich noch eine zweite Gleichung verschafft, indem man für eine andere Entfernung L' die Ablenkung φ' beobachtet. Es ist dann diese Gleichung:

$$L'^3 \, tang \, \varphi' = \frac{2M}{T}\left(1 + \tfrac{1}{2}\frac{l^2}{L'^2}\right).$$

Multiplicirt man die obere Gleichung mit L^2, die untere mit L'^2 und subtrahirt sie von einander, so wird dadurch l eliminirt und man erhält:

$$L^5 \, tang \, \varphi - L'^5 \, tang \, \varphi' = \frac{2M}{T}(L^2 - L'^2),$$

woraus folgt:

$$\frac{M}{T} = \tfrac{1}{2}\frac{L^5 \, tang \, \varphi - L'^5 \, tang \, \varphi'}{L^2 - L'^2} \quad \ldots\ldots \quad 1)$$

Die Abstände L und L' werden am zweckmässigsten im Verhältniss 4 : 3 und ausserdem so gross gewählt, dass die kleinere Entfernung mindestens das Sechsfache der halben Stablänge beträgt. Die Länge der Magnetnadel soll nicht über $\frac{1}{10}$ der kleineren Entfernung betragen. Dass eiserne Gegenstände und insbesondere Magnete aus der Umgebung des Apparates entfernt werden müssen, ist selbstverständlich. Auch sollen die Schwingungsversuche und die Ablenkungsversuche am selben Orte möglichst rasch nach einander und bei derselben Temperatur ausgeführt werden, da letztere auf das magnetische Moment des Stabes von Einfluss ist.

Zahlenbeispiel. Als solches mag die Bestimmung der Horizontalcomponente für Innsbruck dienen, welche als Vorlesungsexperiment ausgeführt wurde.

I. Ermittelung von MT.

Gewicht des prismatischen Magnetstabes: . .	248,317 g
Länge desselben	10,00 cm
Breite „	1,75 „

Trägheitsmoment des Stabes

$$= \frac{10^2 + 1{,}75^2}{12} \cdot 248{,}317 = 2133{,}0927.$$

Hierzu kam in diesem Falle noch das Trägheitsmoment eines kleinen Messingrahmens, welcher zur Aufhängung des Stabes diente

$= 4{,}0238$

Gesammtes Trägheitsmoment $K = 2137{,}1165$.

Eine beiläufige Bestimmung der Schwingungsdauer ergab $t = 12{,}9$ Secunden.

Es wurde notirt im Momente des Durchgangs durch die Ruhelage von links nach rechts die Zeit: $11^h\,7'\,34''$, nach Dreiviertelstunden wiederum: $11^h\,54'\,2''$, die Differenz beträgt $46'\,28'' = 2788$ Secunden.

Da $2788 : 12{,}9 = 216{,}1$, so folgt die Anzahl der inzwischen verflossenen Schwingungen $= 216$ und daraus $t = \frac{2788}{216} = 12{,}9075''$.

Die mittlere Schwingungsweite betrug 3^0. Durch Reduction auf unendlich kleine Bögen erhält man dann $t_0 = 12{,}9070$.

Eine Drehung des Torsionskopfes um 80^0 änderte die Ruhelage um $3^0\;4'5'' = 184{,}1'$

Eine gleiche Drehung nach entgegengesetzter Seite änderte die Ruhelage um . $2^0\,59'\,20'' = 179{,}3'$

Daraus berechnet sich das Torsionsverhältniss:

$$\theta_1 = \frac{184{,}1}{4800 - 184{,}1} = 0{,}0399,$$

$$\theta_2 = \frac{179{,}3}{4800 - 179{,}3} = 0{,}0388,$$

im Mittel: $\theta = 0{,}0394$ *)

$$MT = \frac{\pi^2 K}{t^2\,(1 + \theta)} = \frac{3{,}1416^2 \,.\, 2137{,}1165}{12{,}907^2\,(1 + 0{,}0394)} = 124{,}59.$$

II. Ermittelung von $\frac{M}{T}$.

Ablenkungen der Nadel in der ersten Hauptlage.

Abstand		$L' = 30$ cm				$L = 40$ cm			
Lage des Magnetstabes		Westlich		Oestlich		Westlich		Oestlich	
Abgelesene Spitze der Nadel		Nord-pol	Südpol	Nord-pol	Südpol	Nord-pol	Südpol	Nord-pol	Südpol
Der Nordpol des Stabes gerichtet gegen	Osten	102,5	282,5	102,5	282,5	95,7	275,5	95,4	275,4
	Westen	77,5	257,3	77,3	257,3	84,7	264,7	84,7	264,8
Differenz der Ablenkung		25,0	25,2	25,2	25,2	11,0	10,8	10,7	10,6
Summa: 8 =		12,575 $\varphi' = 12^0\,34'\,30''$				5,262 $\varphi = 5^0\,15'\,43''$			

*) Bei genaueren Versuchen wird man das Torsionsverhältniss viel kleiner wählen, indem man weniger Coconfäden anwendet.

$$\frac{M}{T} = {}^1/_2\ \frac{40^5\,tang\,5^0\,15'\,43'' - 30^5\,tang\,12^0\,34'\,30''}{40^2 - 30^2}$$

$$= {}^1/_2\ \frac{4008700}{700} = 2863{,}35$$

$$T = \sqrt{\frac{MT}{\frac{M}{T}}} = \sqrt{\frac{124{,}59}{2863{,}35}} = \sqrt{0{,}043512} = 0{,}2076.$$

Die Horizontalcomponente in Innsbruck beträgt also (December 1886) 0,2076 Einheiten des Gramm-Centimeter-Secunden-Systems. Nach Fr. Kohlrausch's Tabellen würde sich für Innsbruck, dessen geographische Länge = 29° 3′ 32″ (Ferro), dessen geographische Breite = 47° 16′ 14″ durch Interpolation berechnen für das Jahr 1886 $T = 0{,}2076$
für das Jahr 1887 $T = 0{,}2079$
Die Uebereinstimmung ist zufällig eine grössere, als nach dem Genauigkeitsgrade zu erwarten war. Wenn man, wie Gauss und Weber, als Längeneinheit das Millimeter, als Masseneinheit das Milligramm anwendet, so wird T zehnmal so gross erhalten als oben.

Nach derselben Einheit wie oben war die horizontale Intensität des Erdmagnetismus

in	im Jahre	T
Berlin	1845	0,1780
München	1850	0,1925
Wien	„	0,1995
Pest	1845	0,2036
Genf	„	0,1980
Palermo	1835	0,2435
Lissabon	1858	0,2210
Madrid	„	0,2172
Paris	„	0,1876
London	1840	0,1739
Petersburg	1842	0,1658

Die totale Intensität des Erdmagnetismus J ist gleich der horizontalen Componente dividirt durch den Cosinus der Inclination. Letztere beträgt für Innsbruck $i = 63^0\,15'$, daher $J = \frac{T}{\cos i} = \frac{0{,}2076}{\cos 63^0\,15'} = 0{,}46.$

Bestimmung der Intensität des Erdmagnetismus mit dem magnetischen Theodolit; relative Intensitätsmessungen. 41 Um mit seinem magnetischen Theodolit auch die horizontale Intensität des Erdmagnetismus bestimmen zu können, hat Lamont die entsprechenden Vorrichtungen an demselben angebracht.

Nach den oben entwickelten Principien sind zur Bestimmung der horizontalen Intensität zwei gesonderte Beobachtungen nöthig, nämlich

1) die Beobachtung der Ablenkung, welche ein Magnetstab an einer Declinationsnadel bewirkt, und 2) die Beobachtung der Schwingungen, welche das Ablenkungsstäbchen unter dem Einfluss des Erdmagnetismus macht.

Für die Ablenkungsversuche wird an dem magnetischen Theodolit eine Ablenkungsschiene *PP* aufgesetzt, wie man es Fig. 92 sieht, und nachdem das Instrument so eingestellt worden ist, das die Axe des Fernrohrs normal steht auf der Ebene des Magnetspiegels und man für diese Stellung den Nonius abgelesen hat, wird nun der Ablenkungsmagnet an dem einen Ende der Schiene aufgelegt. — Damit er immer genau

Fig. 92.

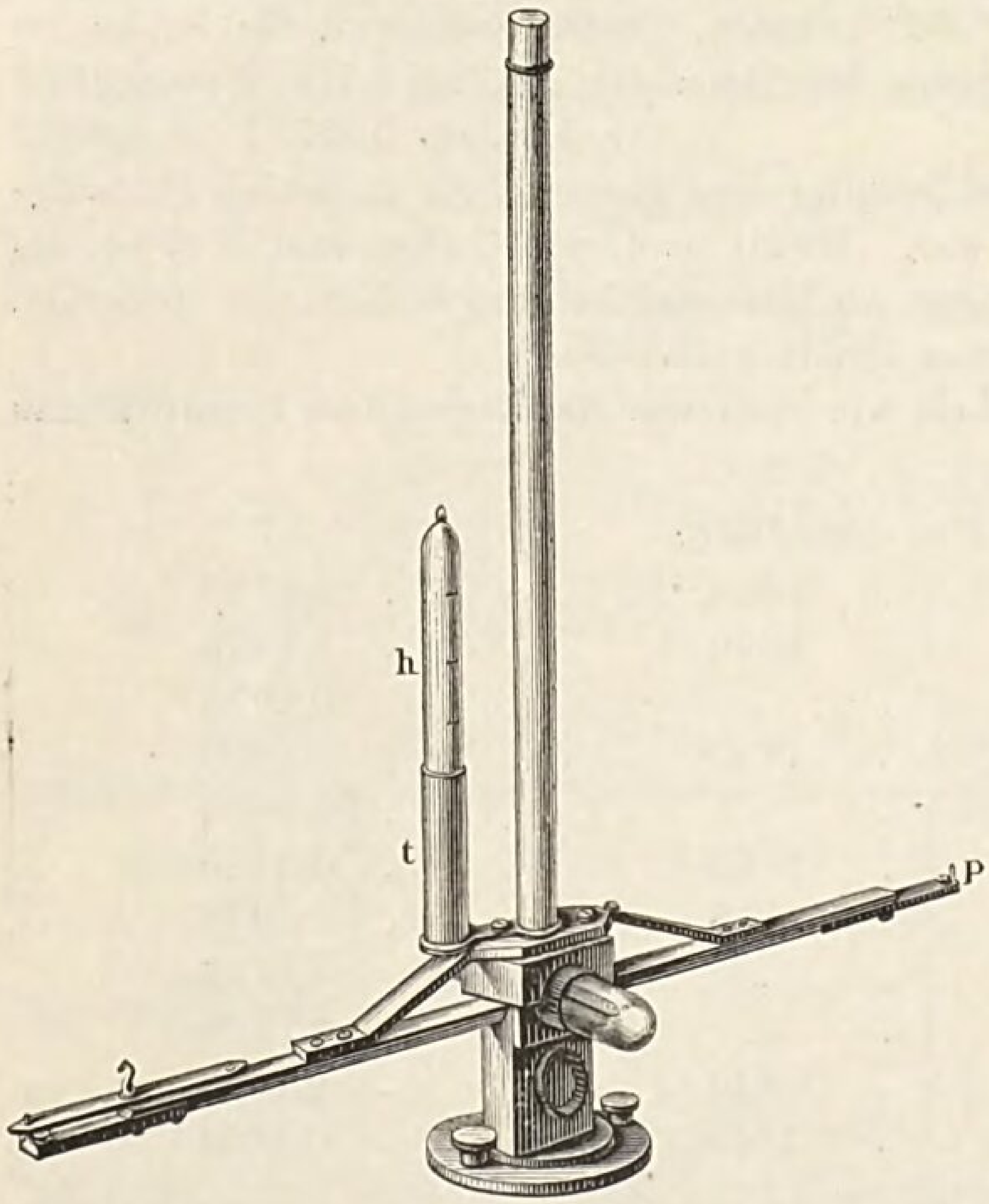
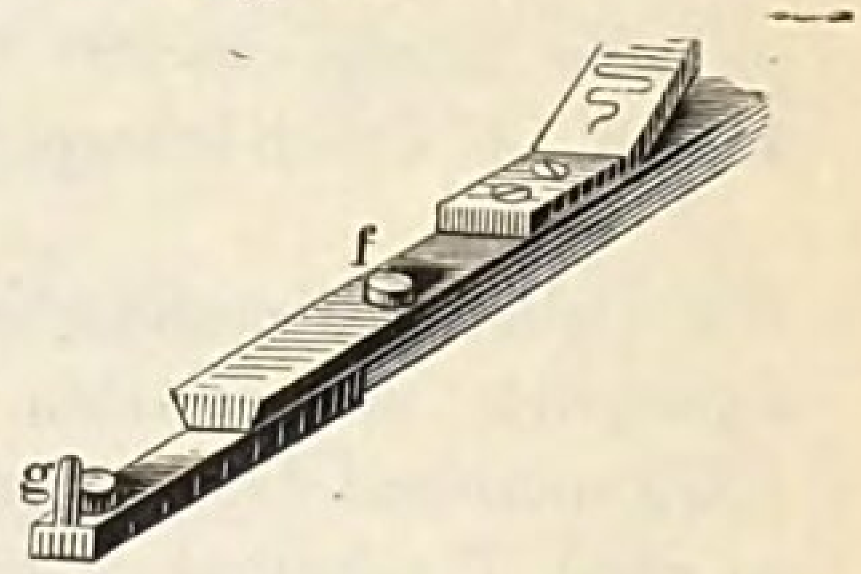


Fig. 93.



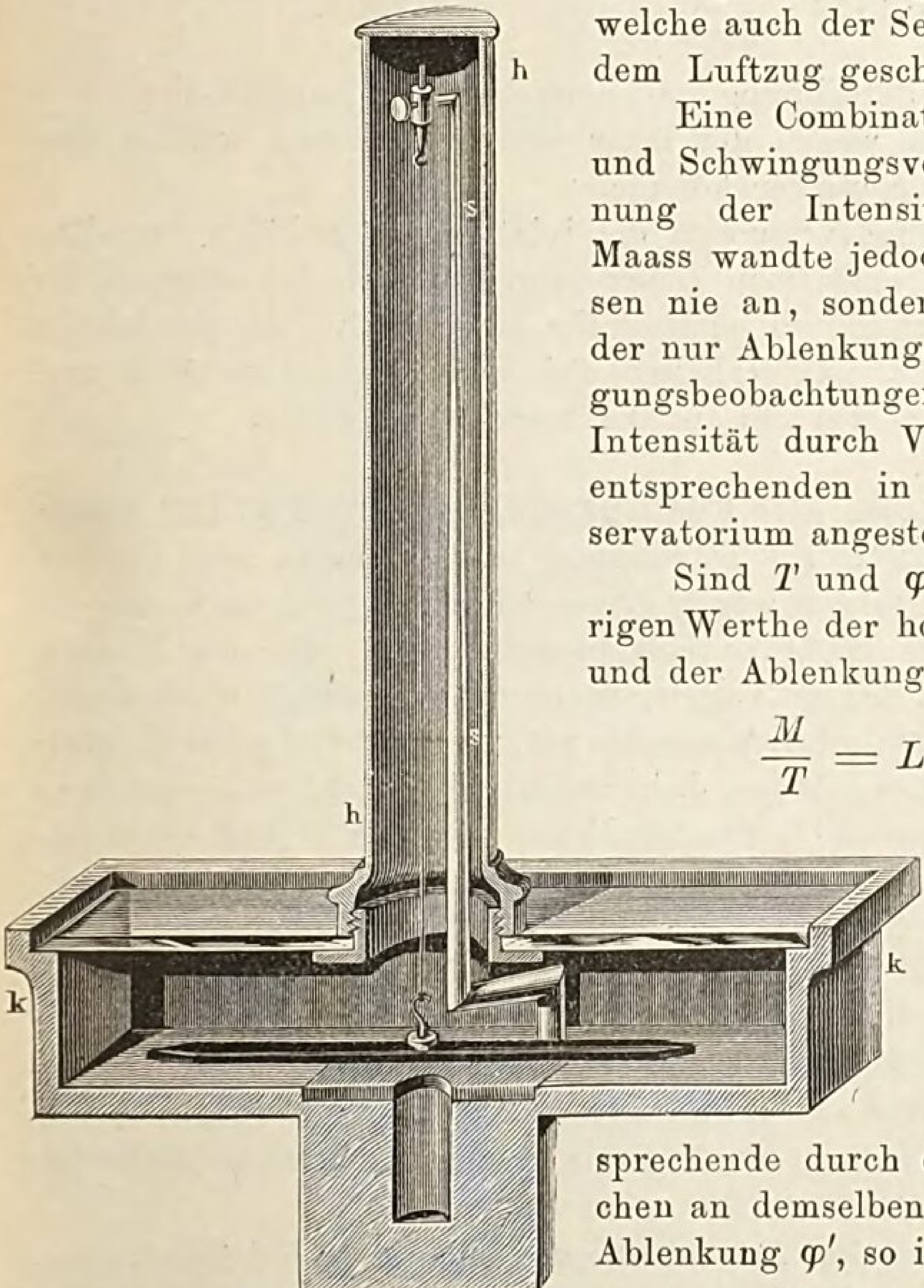
auf dieselbe Stelle kommt, ist auf der Schiene, wie man Fig. 93 sieht, welche das eine Ende der Schiene in grösserem Maassstabe darstellt, ein Knopf *f* und am Ende derselben eine kleine Feder *g* befestigt, welche genau in zwei Löcher des Magnetstäbchens passen.

Hat man die dieser Stellung des Magnets entsprechende Ablenkung abgelesen, so wird der Ablenkungsmagnet so umgelegt, dass sein Nordpol dahin kommt, wo eben sein Südpol lag, und umgekehrt, und abermals die nun nach entgegengesetzter Seite gerichtete Ablenkung abgelesen. Ist dies geschehen, so wird der Ablenkungsmagnet auf das entgegengesetzte Ende der Ablenkungsschiene gebracht und für die dort möglichen beiden Stellungen des Ablenkungsmagnets ebenfalls die entsprechende Ablenkung abgelesen. So erhält man für die Ablenkung vier Werthe, aus denen das Mittel genommen und in Rechnung gebracht wird.

Die Gesammtlänge der Ablenkungsschiene beträgt 34, die Länge des Ablenkungsmagnets beträgt 8 cm.

Um die Schwingungsversuche zu machen, wird der Ablenkungsmagnet mittelst eines ungedrehten Seidenfadens an einem messingenen Säulchen s, Fig. 94, aufgehängt. Um den Magnet vor störenden Luftströmungen zu schützen, wird das Messingsäulchen in ein Holzkästchen kk eingesetzt, welches oben mit einer Glasplatte zugedeckt wird. Unsere Figur zeigt die ganze Vorrichtung in $1/2$ der natürlichen Grösse, und zwar gerade in der Mitte durchgeschnitten. Die Mitte dieser Glasplatte ist durchbohrt, so dass das Messingstäbchen und der die Nadel tragende Faden hindurchgeht. Um den Rand dieser Oeffnung ist ein Schraubengewinde aufgekittet, auf welches die Messinghülse h aufgeschraubt wird, durch welche auch der Seidenfaden vor störendem Luftzug geschützt ist.

Fig. 94.



Eine Combination der Ablenkungs- und Schwingungsversuche zur Berechnung der Intensität nach absolutem Maass wandte jedoch Lamont auf Reisen nie an, sondern er machte entweder nur Ablenkungs- oder nur Schwingungsbeobachtungen und berechnete die Intensität durch Vergleichung mit den entsprechenden in dem Münchener Observatorium angestellten Beobachtungen.

Sind T' und φ die zusammengehörigen Werthe der horizontalen Intensität und der Ablenkung, so haben wir

$$\frac{M}{T} = L^3 \operatorname{tang} \varphi \quad \cdot \cdot \cdot \quad 1)$$

wenn M die Stärke des Stabmagnetismus bezeichnet. Für einen anderen Ort, dessen horizontale Intensität T' ist, sei die entsprechende durch dasselbe Magnetstäbchen an demselben Instrument bewirkte Ablenkung φ', so ist

$$\frac{M}{T} = L^3 \operatorname{tang} \varphi' \quad \cdot \cdot \cdot \quad 2)$$

und wenn man die Gleichung 2) in die Gleichung 1) dividirt

$$\frac{T'}{T} = \frac{\operatorname{tang} \varphi}{\operatorname{tang} \varphi'}$$

oder

$$T' = T \frac{tang\ \varphi}{tang\ \varphi'},$$

kennt man also T, φ und φ', so kann man nach dieser Formel T' berechnen.

So fand man z. B. die zusammengehörigen Werthe von T und φ im Jahre 1850 zu München gleich 0,1952 und 49° 50'. Mit demselben Reisetheodolit und demselben Magnetstäbchen ergab sich zu Aschaffenburg eine Ablenkung von 51° 50', die horizontale Intensität T' für Aschaffenburg ist demnach

$$T' = 0{,}1952 \cdot \frac{tang\ 49^0\ 50'}{tang\ 51^0\ 50'} = 0{,}1859.$$

Für die genaue Berechnung der horizontalen Intensität sind nun gleichfalls Correctionen wegen der Temperatur etc. nöthig, welche hier nicht weiter besprochen werden können.

Um aus Schwingungsversuchen die relativen Intensitäten verschiedener Art abzuleiten, muss man sicher sein, dass sich das magnetische Moment des Stabes nicht durch mechanische, magnetische oder thermische Einflüsse geändert hat. Es verhalten sich dann die Intensitäten umgekehrt wie die Quadratwurzeln aus der Schwingungsdauer.

42 **Andere Methoden zur absoluten Bestimmung der magnetischen Intensität.** Die Schwingungsbeobachtungen nach Gauss sind umständlich und führen wegen der dabei vorausgesetzten Kenntniss des Trägheitsmomentes leicht zu Ungenauigkeiten*). Da das Product TM, welches bei den Schwingungsbeobachtungen ermittelt werden soll, die Bedeutung eines statischen Momentes hat, so lässt sich seine Absolutgrösse auch auf statischem Wege, d. h. aus Gleichgewichtsbeobachtungen bestimmen. Kohlrausch**) wendet hierzu eine dem weiter unten beschriebenen Gauss'schen Bifilarmagnetometer ähnliche Vorrichtung, ein sogenanntes absolutes Bifilarmagnetometer, an. Toepler hat gezeigt***), dass derselbe Zweck in einfacher Weise und sehr genau†) durch Wägung erreicht werden kann. In Folgendem ist das Wesentliche dieser Wägungsmethode kurz erläutert.

Toepler verbindet einen kräftigen Magnetstab NS (Fig. 95) mit einem leichten Wagebalken bc zu einem festen, rechtwinkelig-kreuz-

*) Vergl. F. Kohlrausch, „Absolute Messung mittelst bifilarer Aufhängung, insbesondere zwei Methoden zur Bestimmung der erdmagnetischen Horizontalintensität ohne Zeitmessung." Wiedem. Ann. 17, S. 737. 1882.

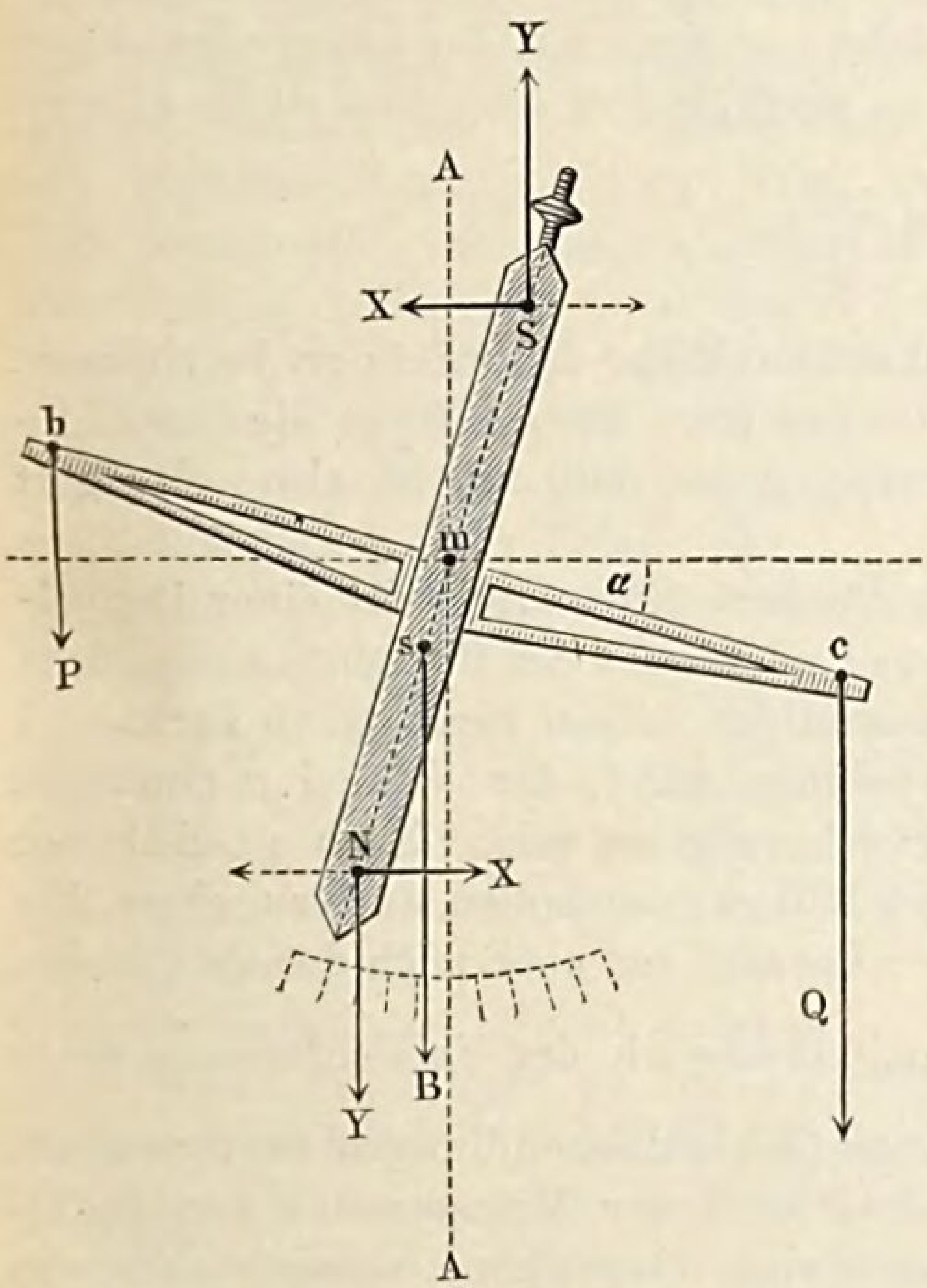
**) Vergl. dieselbe Abhandlung, auch „Leitfaden der praktischen Physik". 1844, S. 192.

***) Sitzungsberichte d. Berl. Akad. d. Wiss. 1883. XXXVII, S. 1029 und Wiedem. Ann. 21, S. 158. 1884.

†) Vergl. Freyberg, „Beobachtungen mit der magnetischen Wage von Toepler." Wiedem. Ann. 25, S. 511. 1885.

förmigen System. Die Mittelschneide m liegt mit den Endschneiden b und c möglichst in einer Ebene. Im Uebrigen besitzt das Instrument, wie eine gewöhnliche Wage, bei b und c leichte Wagschalen, eine Arretirungsvorrichtung, Glasgehäuse etc., jedoch ist die Anordnung getroffen, dass das ganze Instrument um die Lothlinie AA gedreht werden kann. Zuerst wird nun die Schwingungsebene der Wage in die Ebene des magnetischen Meridians (die Ebene der Figur) eingestellt, so dass beispielsweise der Arm cm nach Norden gerichtet ist. Alsdann äquilibrirt man die Wage durch Auflegen einiger Gewichtsstücke auf die Schalen bei b und c, wobei es nicht nöthig ist, dass der Balken ganz horizontal einspielt; er kann vielmehr mit der Horizontalen irgend einen kleinen Winkel α bilden. Die Ruhelage wird an einer Scala am unteren Magnetende (oder mit einer Spiegelvorrichtung) abgelesen.

Fig. 95.



Die bei c wirkende Schwerkraft (Schale einschliesslich Zulage) heisse in absolutem Maasse Q; das statische Moment dieser Kraft, nämlich $Q.\overline{cm}\cos\alpha$, hält den übrigen am System wirkenden Kräften das Gleichgewicht. Es kommen hierbei in Betracht:

die Gesammtbelastung P der Schneide b mit dem statischen Momente $P.\overline{bm}\cos\alpha$;

die im Schwerpunkte s angreifende Gesammtschwere B des Balkens und Magnets mit dem statischen Momente

$$B\,.\,\overline{sm}\sin\alpha;$$

ferner die von der Verticalintensität V des Erdmagnetismus an den Polen N und S erzeugten antiparallelen Kräfte YY, deren statisches Moment, wenn M das magnetische Moment des Stabes (Stabmagnetismus) bedeutet, gleich $VM\sin\alpha$ ist;

endlich die von der Horizontalintensität T erzeugten Kräfte XX, deren Drehmoment $TM\cos\alpha$ ist.

Im Gleichgewichtsfalle gilt mit Rücksicht auf das Vorzeichen die Gleichung:

$$Q\overline{cm}\cos\alpha - P\overline{bm}\cos\alpha - B\overline{sm}\sin\alpha - VM\sin\alpha - TM\cos\alpha = 0\,. \quad 1)$$

Nun wird die Wage arretirt und um die Verticale AA um 180^0 gedreht, wobei die Belastung P unverändert gelassen wird. Durch eine

geeignete Belastung Q_1 der Schneide c wird nun wieder bewirkt, dass der Arm $\overline{cm}$ genau wie vorher gegen den Horizont einspielt, was an der Ablesevorrichtung zu erkennen ist. Die bewirkte Veränderung ist nun offenbar gerade so, als ob die Wage stehen geblieben wäre und nur die Richtung der Horizontalkräfte XX in die entgegengesetzte (punktirte) Lage gekommen wäre; daher ist jetzt:

$$Q\overline{cm}\cos\alpha - P\overline{bm}\cos\alpha - B\overline{sm}\sin\alpha - VM\sin\alpha + TM\cos\alpha = 0 \quad 2)$$

Die Subtraction der zweiten von der ersten Gleichung giebt:

$$(Q - Q_1)\,\overline{cm}\cos\alpha - 2\,TM\cos\alpha = 0.$$

Nun ergiebt sich die Differenz der absoluten Schwerkräfte $(Q - Q_1)$ offenbar aus der Differenz der in beiden Fällen auf die Schale c gelegten Grammgewichte $(q - q_1)$, welche nur noch mit der Schwerebeschleunigung g des betreffenden Ortes zu multipliciren ist. Also ist in absolutem Maasse

$$TM = \frac{q - q_1}{2} \cdot g \cdot \overline{cm}.$$

Die Armlänge $\overline{cm}$ ist in bekannter Weise besonders zu bestimmen. Bei Anwendung eines Magnetstabes von etwa 350 g beträgt die Gewichtsdifferenz $(q - q_1)$ in unseren Breiten gegen 200 mg, ist also sehr gut wägbar.

Die Methode misst also das Product TM vermittelst einer Doppelwägung und einer Längenmessung; sie besitzt die Bequemlichkeit, dass unter den gemachten Voraussetzungen der Balken nicht genau horizontal einzuspielen braucht, da sich, wie man sieht, der Winkel α eliminirt. Auch braucht die Wage nicht gleicharmig zu sein. Nach geschehener Wägung wird der Magnet sammt Balken abgehoben und zu einer Ablenkungsbeobachtung nach Gauss benutzt, um auch noch den Quotienten $\frac{M}{T}$ und daraus T zu bestimmen. Bezüglich der Vorsichtsmaassregeln und Correctionen ist auf die citirten Originalabhandlungen zu verweisen.

Schliesslich sei bemerkt, dass auch der Magnetismus von Stahlstäben (magnetisches Moment) nach einer sinnreichen, schon vorher von v. Helmholtz*) angegebenen Methode direct durch Wägung in absolutem Maasse bestimmt werden kann.

43 **Variationen der Intensität des Erdmagnetismus.** Die Intensität des Erdmagnetismus hat ihre täglichen Variationen gerade so wie die Declination und Inclination, erst in neuerer Zeit aber hat man diesem für die Theorie des Erdmagnetismus so wichtigen Elemente eine grössere Aufmerksamkeit geschenkt. Gauss hat einen Apparat, das

*) Sitzungsberichte der Berl. Akademie 1883. XVI, S. 405 und Kohlrausch, Leitfaden der prakt. Physik. 1884. S. 200.

Bifilarmagnetometer, construirt, durch welchen die geringste Aenderung der Intensität des Erdmagnetismus nachgewiesen und dem Auge ganz in derselben Weise sichtbar gemacht wird, wie die Variationen der Declination durch das gewöhnliche Magnetometer.

Eine erschöpfende Theorie der Bifilaraufhängung wurde von F. Kohlrausch*) gegeben und eine Anzahl Instrumente (Magnetometer, Galvanometer) beschrieben, welche auf der Bifilaraufhängung beruhen.

Wenn es uns auch zu weit führen würde, die Einrichtung und den Gebrauch des Bifilarmagnetometers vollständig aus einander zu setzen, so müssen wir doch wenigstens das Princip kennen lernen, auf welchem es beruht.

Wir haben oben eine Methode kennen gelernt, mittelst deren man die Intensität des Erdmagnetismus mit grosser Genauigkeit ermitteln kann; dieselbe ist aber unbrauchbar, sobald es sich darum handelt, die täglichen Variationen der Intensität zu beobachten. Jene Methode zur Bestimmung der magnetischen Intensität beruht nämlich auf der Verbindung mehrerer Operationen, welche sämmtlich eine nicht ganz kurze Zeit in Anspruch nehmen, während welcher sich die Intensität ändern kann; man erhält auf diese Weise also nur Mittelwerthe der Intensität, es bleibt ganz verborgen, ob und welche Variationen sie während dieser Zeit erlitten hat.

Die Schwingungsdauer eines Magnetstabes, deren genaue Ermittelung namentlich eine etwas längere Zeit in Anspruch nimmt, dient nur dazu, mittelbarer Weise das Drehungsmoment zu bestimmen, welches die erdmagnetische Kraft dem Stabe ertheilt, wenn er sich nicht im magnetischen Meridian befindet. Mit Hülfe des Gauss'schen Bifilarmagnetometers kann man dieses Drehungsmoment auf directem Wege ohne Schwingungsbeobachtungen scharf bestimmen und seine Veränderungen sicher und schnell messen.

Wenn ein Körper an zwei Fäden aufgehängt und nur dem Einflusse der Schwerkraft ausgesetzt ist, so befindet er sich nur dann im Gleichgewichte, wenn die beiden Fäden in einer Ebene liegen, und wenn der Schwerpunkt des Körpers sich in derselben Ebene zwischen der verlängerten Richtung der beiden Fäden befindet. Sobald man aber den Körper aus dieser Gleichgewichtslage herausdreht, so werden die Fäden gleichsam spiralförmig gewunden, und der aufgehängte Körper wird etwas gehoben. Lässt man ihn wieder frei, so sucht sein Schwerpunkt wieder die ursprünglich tiefste Lage einzunehmen und es tritt daher eine Kraft auf, die den Körper in seine Gleichgewichtslage zurückzuführen strebt. Die Grösse dieser richtenden Kraft hängt von der Länge der

*) Absolute Messung mittelst bifilarer Aufhängung etc. Wiedem. Ann. 17. S. 737. 1882.

Fäden, von ihrer Entfernung und von der Grösse des Gewichtes ab, welches sie zu tragen haben *).

Fig. 96.

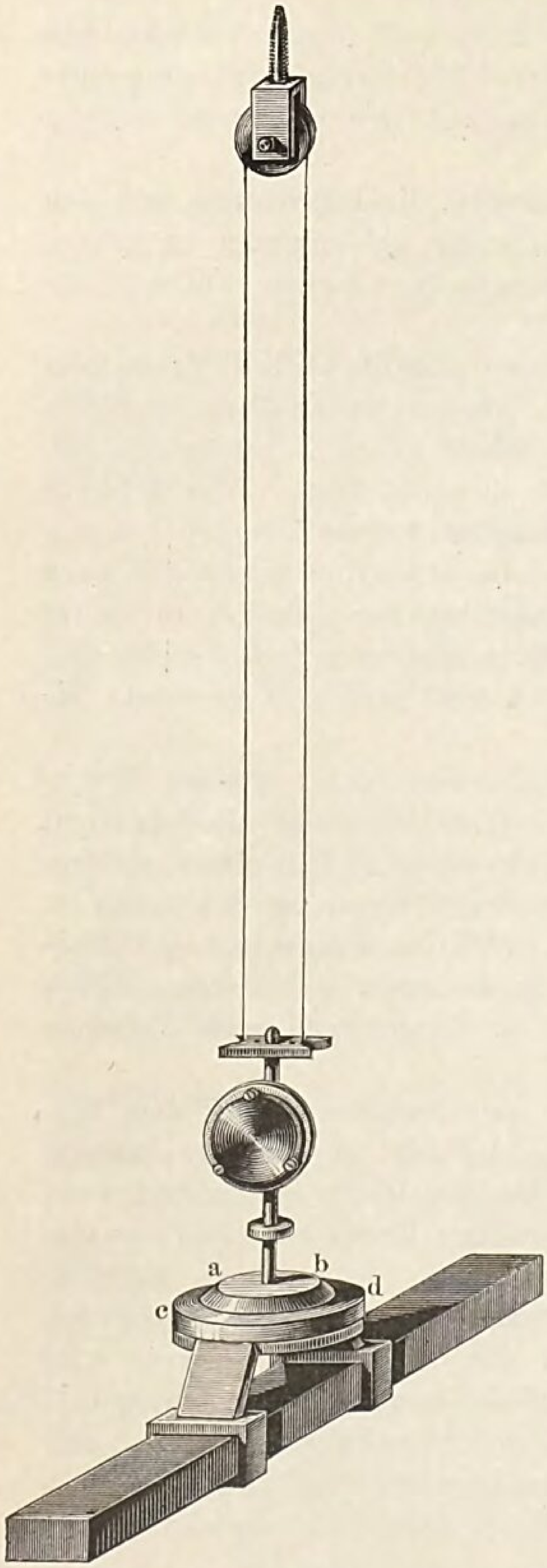
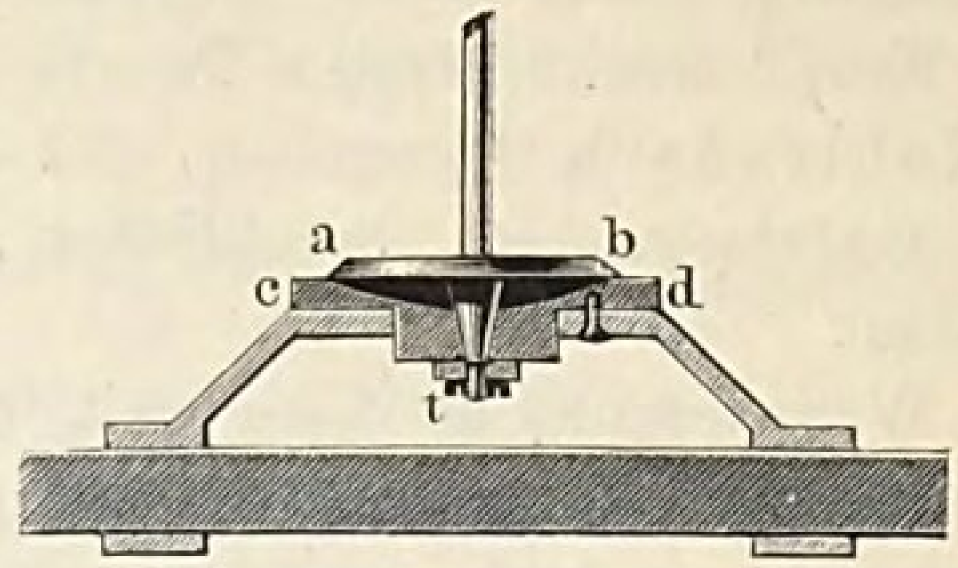


Fig. 97.



Das Wesentliche der Einrichtung eines Bifilarmagnetometers ist aus Fig. 96 und 97 zu ersehen. Von einer Rolle, Fig. 96, deren Scheere in die Decke des Beobachtungslocales eingeschraubt wird, hängen die beiden Drähte herab, welche das Magnetometer tragen. Das Stäbchen, welches den Spiegel trägt, endigt unten in einer kreisförmigen Scheibe *ab*; an der unteren Fläche dieser Scheibe sitzt ein conischer Zapfen, um welchen die Metallscheibe *cd* beliebig gedreht und durch Anziehen der Schraubenmutter *t* in jeder beliebigen Stellung festgestellt werden kann, wie durch Fig. 97 wohl verständlich sein wird. An der Scheibe *cd* ist dann das Schiffchen mit dem Magnetstab in unveränderlicher Weise befestigt.

*) Die vollständige Formel für die Directionskraft der bifilaren Aufhängung lautet nach F. Kohlrausch:

$$D = g\,m\,\frac{l_1\,l_2}{4\,l} + \frac{2\,\pi}{5}\,\frac{\varrho^4\,\varepsilon\,g}{l},$$

worin g die Acceleration der Schwere,
l_1 und l_2 oberer und unterer Fadenabstand,
m die angehängte Masse mehr der halben Masse der Drähte,
l die mittlere Drahtlänge,
ε deren Elasticitätsmodul,
ϱ deren Halbmesser

bedeuten. Das Drehungsmoment ist dann gleich $D \sin \alpha$, wenn α der Ablenkungswinkel ist.

Diese Vorrichtung, welche es möglich macht, den Magnetstab in seiner Horizontalebene beliebig zu drehen, ohne die gegenseitige Lage der Aufhängefäden zu ändern, wird ebenfalls Torsionskreis genannt und dient demselben Zwecke wie der Torsionskreis des Magnetometers.

Während nun die Aufhängefäden den Apparat stets so zu stellen streben, dass sie ohne Torsion in einer und derselben Verticalebene liegen, äussert der Erdmagnetismus ein Bestreben, die Axe des Magnetstabes in den magnetischen Meridian zu stellen; es wird sich also in der That die Axe des Magnetstabes zwischen dem magnetischen Meridian und derjenigen Linie einstellen, in welche der Stab durch die Torsionskraft der Fäden gebracht werden würde, wenn er nicht magnetisch wäre. Mit Hülfe des Torsionskreises kann man es leicht dahin bringen, dass die oben bezeichnete Zwischenlage einen beliebigen Winkel mit dem magnetischen Meridian macht, und zur Beobachtung der Variationen der Intensität wird der Torsionskreis so gedreht, dass das Gleichgewicht stattfindet, wenn die Axe des Magnetstabes nahezu rechtwinkelig auf dem magnetischen Meridian steht.

Es ist klar, dass unter diesen Umständen die geringste Aenderung in der Intensität des Erdmagnetismus die Lage des Magnetstabes ändern muss; wenn sie stärker wird, so nähert er sich dem magnetischen Meridian, wenn sie abnimmt, so entfernt er sich von demselben. Da nun die Intensität des Erdmagnetismus fortwährend variirt, so schwankt der Magnetstab fortwährend in derselben Weise, wie der Magnetstab eines einfachen Magnetometers; die Veränderungen in der Lage des Stabes werden auf dieselbe Weise beobachtet wie beim Magnetometer; da dieselben sehr gering sind, so kann die Aenderung der Intensität der Drehung des Magnets proportional gesetzt werden.

Um dann den Werth eines Scalentheils nach absolutem Maasse zu erhalten, muss man künstlich die horizontale Intensität um eine bekannte Grösse erhöhen oder vermindern und beobachten, um wie viele Scalentheile hierdurch der Magnet abgelenkt wird. Man erreicht dies durch Annäherung eines zweiten Magnetstabes von bekanntem magnetischen Moment M. Bringt man diesen in derselben Horizontalebene in ziemlich grossem Abstande r in solche Lage, dass er mit seiner Axe in den magnetischen Meridian zu liegen kommt, also senkrecht auf den Bifilarmagnet gerichtet ist, so übt er, wenn das magnetische Moment des letzteren $= m$ ist, eine solche Wirkung aus, dass hierdurch das Drehungsmoment des Erdmagnetismus um die Grösse

$$\frac{2\,Mm}{r^3}$$

vermehrt oder vermindert wird, je nachdem der eine oder der andere Pol zugewendet ist.

Die Ablenkung durch diesen Magnet betrage n Scalentheile, die Aenderung der horizontalen Intensität, welche eine Ablenkung um einen

Scalentheil hervorbringt, werde mit Δ bezeichnet. Nimmt dann T zu, so dass es $T + \Delta$ wird, so wird das vom Erdmagnetismus ausgeübte Drehungsmoment von $m\,T$ bis $m\,(T + \Delta)$, also um $m\,\Delta$ zunehmen. Wir können somit die Proportion ansetzen:

$$n : \frac{2\,M m}{r^3} = 1 : m\,\Delta,$$

in Worten: Wenn eine Ablenkung von n Scalentheilen durch ein Moment

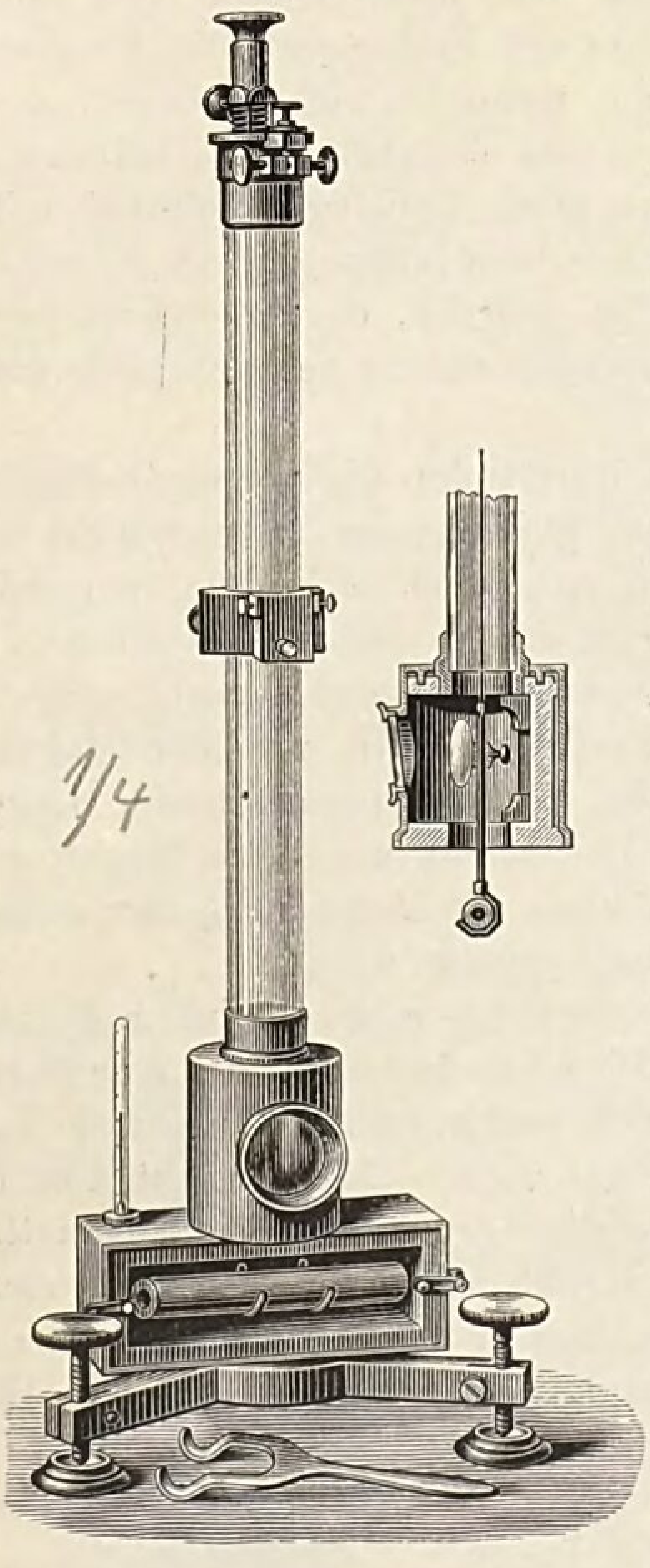
$$\frac{2\,M m}{r^3}$$

hervorgebracht wird, welches Moment $m\,\Delta$ wird dann die Ablenkung von einem Scalentheil bewirken? Man findet dann

$$\Delta = \frac{2\,M}{n\,r^3}.$$

Man bestimmt am bequemsten den doppelten Werth von n, indem man den genäherten Magnetstab umlegt und die den beiden Lagen entsprechende Stellung des Bifilarmagnetes beobachtet. Bewegt sich dann ein anderes Mal unter alleinigem Einflusse der Variation des Erdmagnetismus der Bifilarmagnet aus einer Stellung a_1 in eine Stellung a_2, so schliessen wir auf eine Aenderung von T um $(a_2 - a_1)\,\Delta$.

Fig. 98.

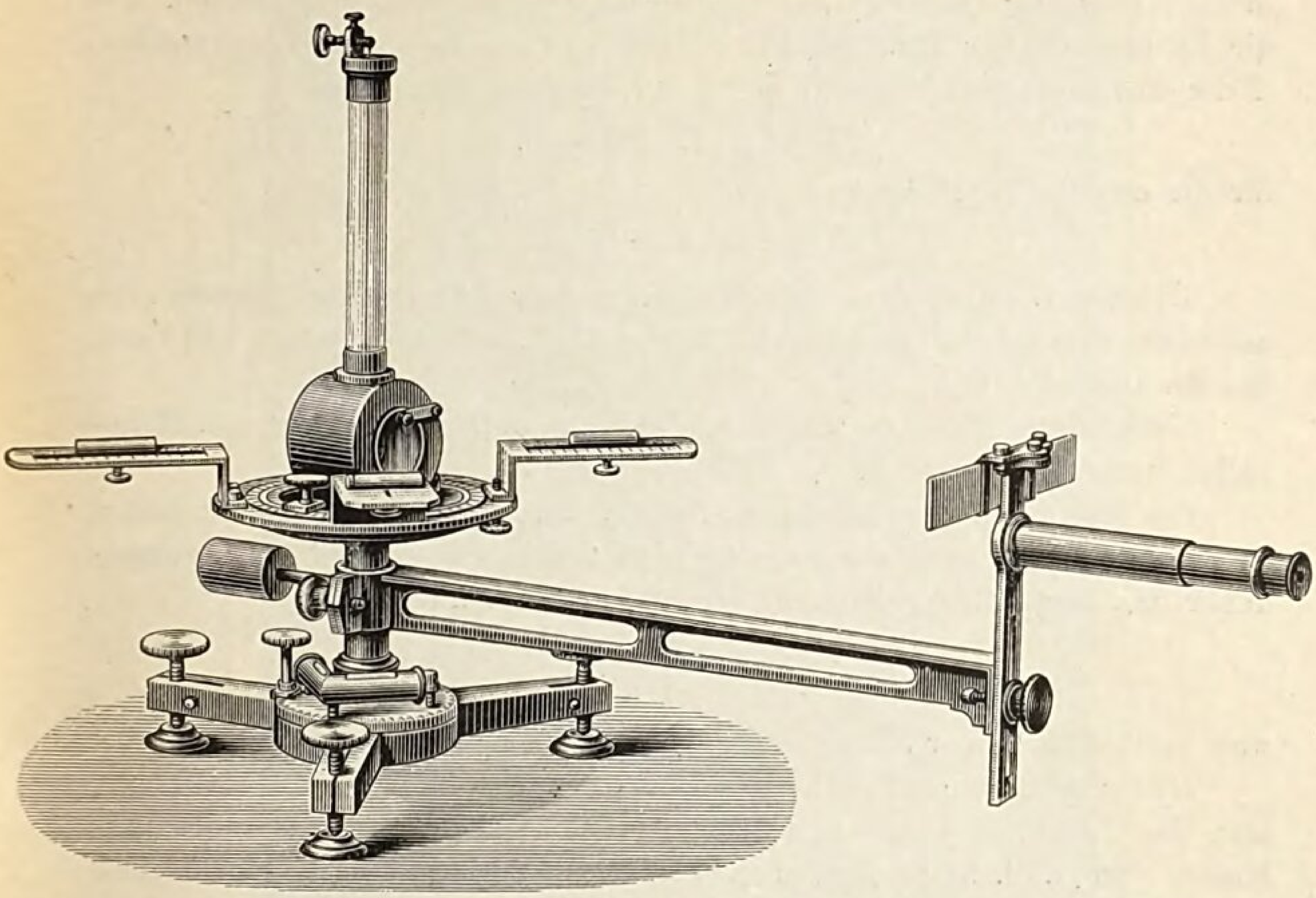


Das beschriebene Instrument von Gauss leidet an dem Nachtheil, dass es nicht transportabel ist. Fr. Kohlrausch gebührt das Verdienst, die Bifilaraufhängung zur Construction verbesserter tragbarer Instrumente angewendet zu haben. Fig. 98 zeigt sein „Tragbares Bifilarmagnetometer" in $^1/_4$ der natürlichen Grösse, in der Ausführung von Hartmann und Braun. Bezüglich des Gebrauches des Instrumentes und der von Fr. Kohlrausch vereinfachten Methoden der Orientirung und Aichung desselben müssen wir auf die Originalabhandlungen des Autors*) verweisen. Um ferner auch die örtlichen Veränderungen der magnetischen Intensität, z. B. innerhalb

*) Wiedemann's Annalen XV, 533 (1882), XVII, 737 (1882).

des Experimentirraumes, genau messen zu können, hat Fr. Kohlrausch das in Fig. 99 abgebildete „Tragbare Intensitäts-Variometer mit vier Ablenkungsstäben" construirt, welches nicht allein als Local-Variometer dient, sondern wegen seiner vielseitigen Anwendbarkeit (als gewöhn-

Fig. 99.



liches Magnetometer, als Instrument für die zeitlichen und für die örtlichen Variationen der Horizontalintensität) den Namen „Universalmagnetometer" verdient *).

Bestimmung des magnetischen Moments eines Stabes nach absolutem Maasse. Specifischer Magnetismus. 44 Diese Aufgabe ist bereits gelöst, wenn man denselben Stab zur Bestimmung der Horizontalcomponente des Erdmagnetismus benutzt hat. Man braucht nur die Werthe für MT und $\frac{M}{T}$, statt sie zu dividiren, mit einander zu multipliciren und die Quadratwurzel auszuziehen. So z. B. würde man für den im §. 40 angewandten Magnetstab

$$M = \sqrt{2863,35 \times 124,59} = \sqrt{356744}$$
$$= 597 \text{ Einheiten (Cent.-Gram.-Sec.)}$$

*) Theorie und Gebrauch desselben siehe Wiedem. Ann. XIX, 130 (1883) und XXIX, 51 (1886). Wir machen hier auch auf die von Th. Edelmann construirten einschlägigen Instrumente aufmerksam, welche in dem mehrfach citirten Buche „Neuere Apparate etc." beschrieben sind.

erhalten. (Bei Anwendung von Millimetern und Milligrammen wird der Stabmagnetismus 10000 mal so gross gefunden.)

Ist die Horizontalcomponente bereits bekannt und keine grosse Genauigkeit erforderlich, so braucht man mit dem Magnet, dessen magnetisches Moment M zu bestimmen ist, nur eine Ablenkungsbeobachtung in der ersten oder zweiten Hauptlage an einer Magnetnadel zu machen. Ist die Entfernung der Mittelpunkte beider $= L$, φ der Ablenkungswinkel, T die Horizontalcomponente, so ist für die erste Hauptlage

$$M = \frac{1}{2} L^3 T \tang \varphi,$$

für die zweite Hauptlage

$$M = L^3 T \tang \varphi.$$

Beträgt L mindestens das Sechsfache der Länge des Magnets, so macht die Vernachlässigung des Einflusses des letzteren höchstens $1\frac{1}{2}$ Proc. des Resultates aus*).

Nach dieser Methode kann auch das magnetische Moment von Mineralien untersucht werden.

Bei Magneten regelmässiger Gestalt, deren Trägheitsmoment leicht zu berechnen ist, kann man auch durch Bestimmung der Schwingungsdauer das magnetische Moment ermitteln. Man findet

$$M = \frac{\pi^2 K}{t^2 T},$$

was nach dem früher Mitgetheilten keiner weiteren Erklärung bedarf.

Unter dem specifischen Magnetismus eines Körpers versteht man das Verhältniss zwischen seinem magnetischen Moment und seiner Masse. So z. B. hätte der in §. 40 benutzte Magnet den specifischen Magnetismus

$$\frac{597}{248} = 2{,}4.$$

Dieser specielle Werth ist ein sehr kleiner, also die Magnetisirung eine verhältnissmässig schwache, denn der specifische Magnetismus kann unter günstigen Verhältnissen, insbesondere bei langen und dünnen Stäben, bis 100 steigen.

45 **Magnetische Karten, Isogonen, Isoklinen und Isodynamen.** In den §§. 14 und 15 haben wir bereits Einiges über die verschiedenen Lagen der Declinations- und Inclinationsnadel an verschiedenen Orten der Erdoberfläche mitgetheilt. Nachdem wir dann später die Instrumente und Methoden kennen gelernt haben, um die Grösse der Declination und Inclination genau zu messen, erübrigt uns noch zu zeigen, wie sich diese Resultate übersichtlich auf magnetischen Karten durch ein System von Curven darstellen lassen.

Man unterscheidet dreierlei Arten magnetischer Curven, nämlich:

*) Kohlrausch, Prakt. Phys. S. 173.

1) die **isogonischen Linien**, Linien gleicher magnetischer Declination,

2) die **isoklinischen Linien**, Linien gleicher magnetischer Inclination, und

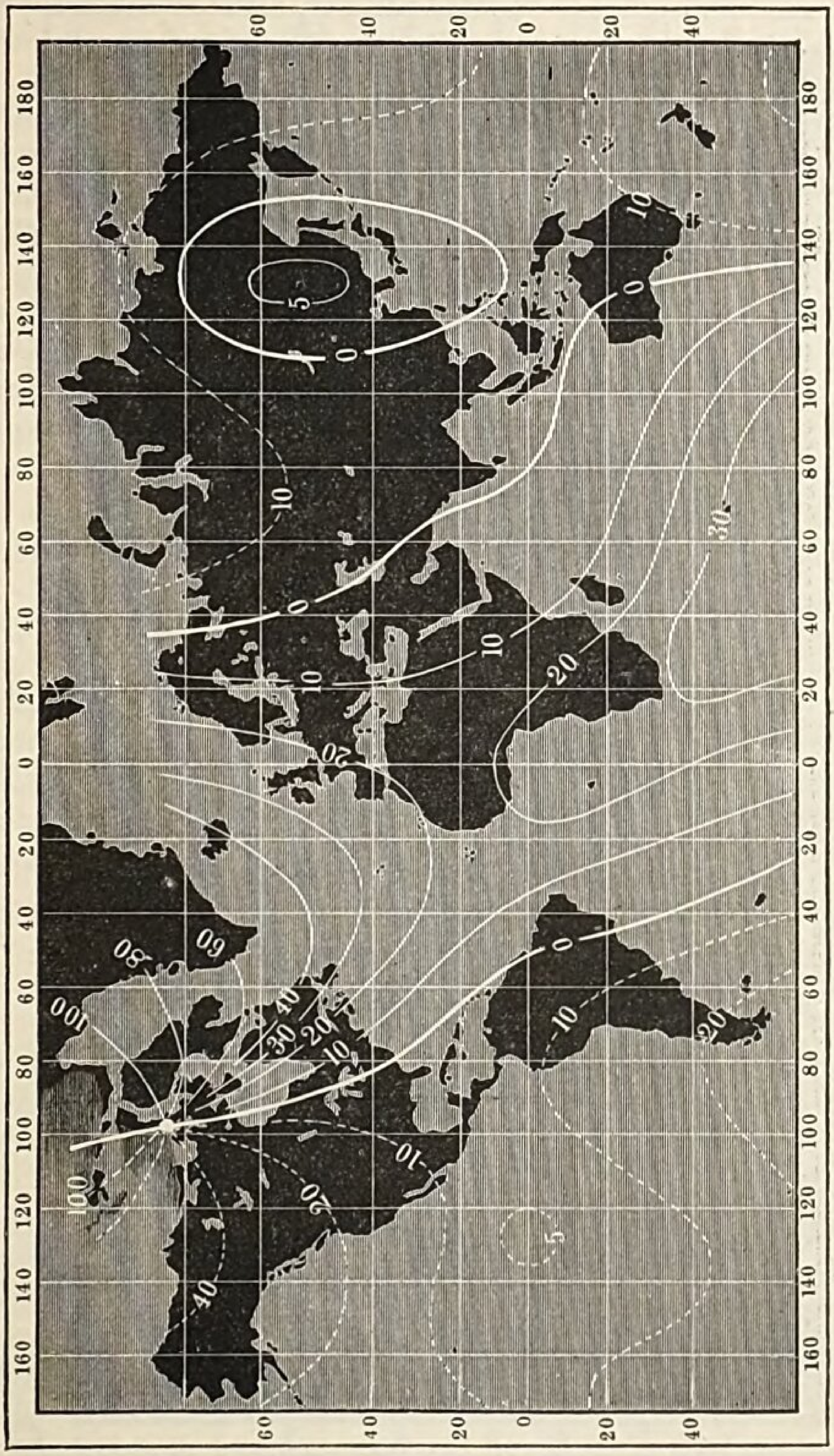


Fig. 100.

3) die **isodynamischen Linien**, Linien gleicher magnetischer Intensität.

Die Fig. 100 ist eine **Declinationskarte**, d. h. sie stellt den Verlauf der **isogonischen Linien** dar, und zwar zwischen dem 80. Grade

nördlicher und dem 60. Grade südlicher Breite. Die ausgezogenen Curven entsprechen westlicher, die punktirten aber östlicher Declination. Auf den mit 0 bezeichneten Curven zeigt die horizontale Magnetnadel genau nach Norden.

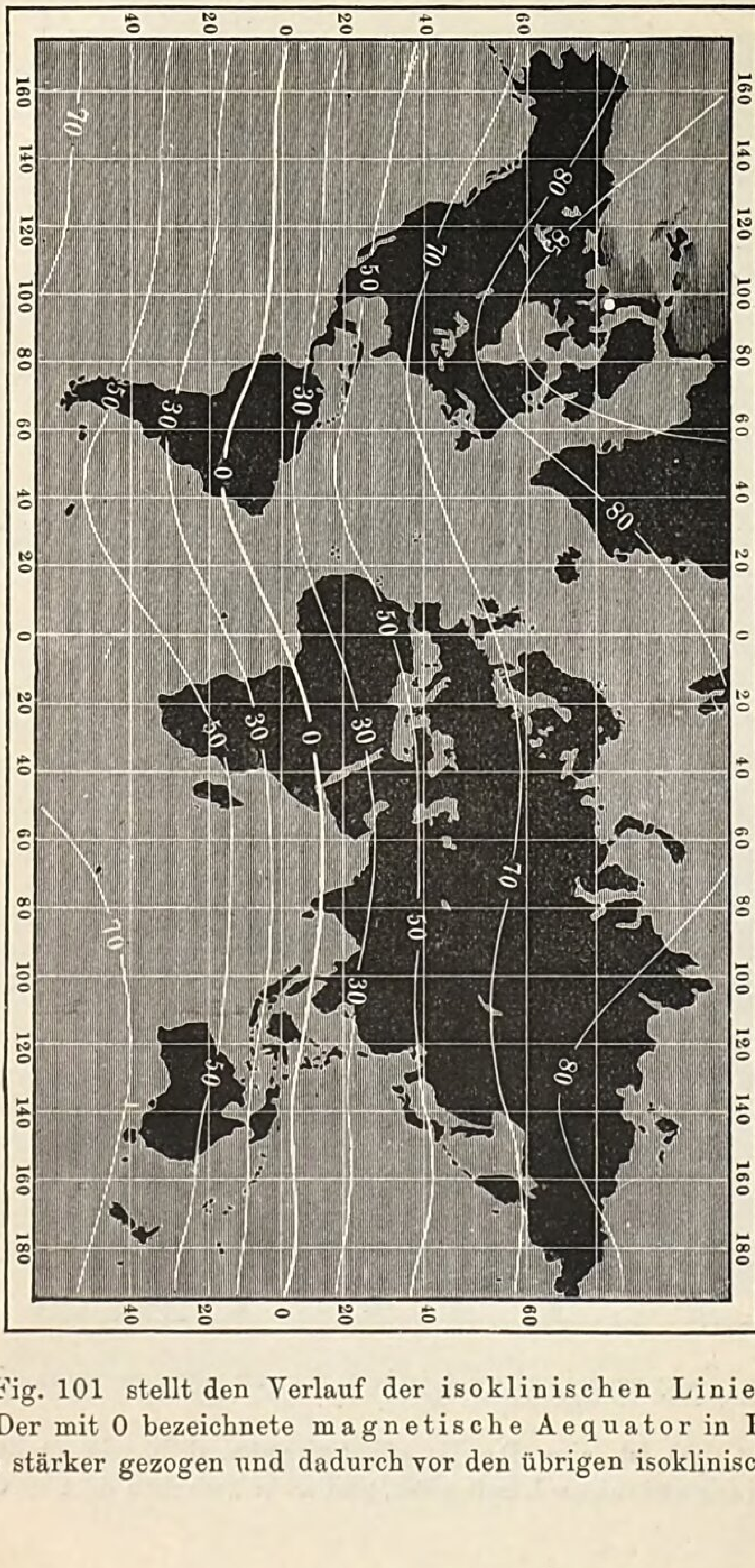


Fig. 101.

Fig. 101 stellt den Verlauf der isoklinischen Linien dar.

Der mit 0 bezeichnete magnetische Aequator in Fig. 101 ist etwas stärker gezogen und dadurch vor den übrigen isoklinischen Curven

ausgezeichnet. Nördlich von demselben senkt sich das Nordende, südlich das Südende der Inclinationsnadel.

Die magnetischen Pole der Erde sind diejenigen Punkte, für welche sich die Inclinationsnadel senkrecht stellt. Der magnetische Nordpol, welchen Capitän Ross auf der Insel Melville wirklich erreichte, findet sich auf den Karten Fig. 100 und Fig. 101. Der magnetische Südpol, dessen Lage nur aus dem Verlauf der magnetischen Curven auf der Südhälfte der Erde erschlossen werden kann, findet sich nicht mehr auf diesen Karten.

Definirt man die magnetische Axe als die Linie des grössten magnetischen Moments, dann fällt dieselbe nicht genau mit der Verbindungslinie der genannten beiden Pole zusammen, sondern weicht um ungefähr 2^0 von der letzteren ab.

Wäre der Erdmagnetismus regelmässig vertheilt, so müsste der magnetische Aequator einen grössten Kreis bilden, ähnlich wie die Ekliptik am Himmelsgewölbe, und die beiden magnetischen Pole der Erde müssten einander diametral gegenüber stehen. Aus Fig. 101 erkennt man den unregelmässigen Verlauf des magnetischen Aequators, woraus sich demnach die unregelmässige Vertheilung des Erdmagnetismus ergiebt, in Folge deren auch die beiden magnetischen Pole der Erde keineswegs einander diametral gegenüber stehen.

Nach dem, was bereits im §. 20 über die secularen Variationen des Erdmagnetismus gesagt wurde, ist klar, dass der Verlauf der magnetischen Curven sich allmälig ändern müsse, und in der That zeigen die magnetischen Karten vom Anfang des achtzehnten Jahrhunderts ein ganz anderes Bild als die obigen Karten, welche für das Jahr 1860 construirt sind. Aus der allmäligen Veränderung in der Lage der magnetischen Curven ergiebt sich auch, dass die magnetischen Pole der Erde nach und nach ihre Stelle ändern müssen.

Mit den oben besprochenen isogonischen Linien nicht zu verwechseln sind die magnetischen Meridiancurven, welche den Kraftlinien des Erdmagnetismus auf der Erdoberfläche entsprechen. Sie entstehen durch die Bewegung eines Punktes, der überall der Richtung der Magnetnadel folgt, und gehen sämmtlich mit sanften Krümmungen von einem magnetischen Pol zum anderen.

Ueber die Ursache des Erdmagnetismus. Ueber die Ursache der erdmagnetischen Erscheinungen hat man die verschiedensten Ansichten aufgestellt, welche grösstentheils wieder aufgegeben worden sind. Biot suchte dieselbe durch Annahme eines starken Magneten im Inneren der Erde, Hansteen durch die Annahme zweier excentrischer und schief gestellter, ungleich polarer Magnete im Erdinneren zu erklären. Gauss verzichtete auf eine physikalische Hypothese und ersetzte dieselbe durch eine mathematische Darstellung, welche, auf die besten Beobachtungen gestützt, die magnetischen Constanten für alle Punkte 46

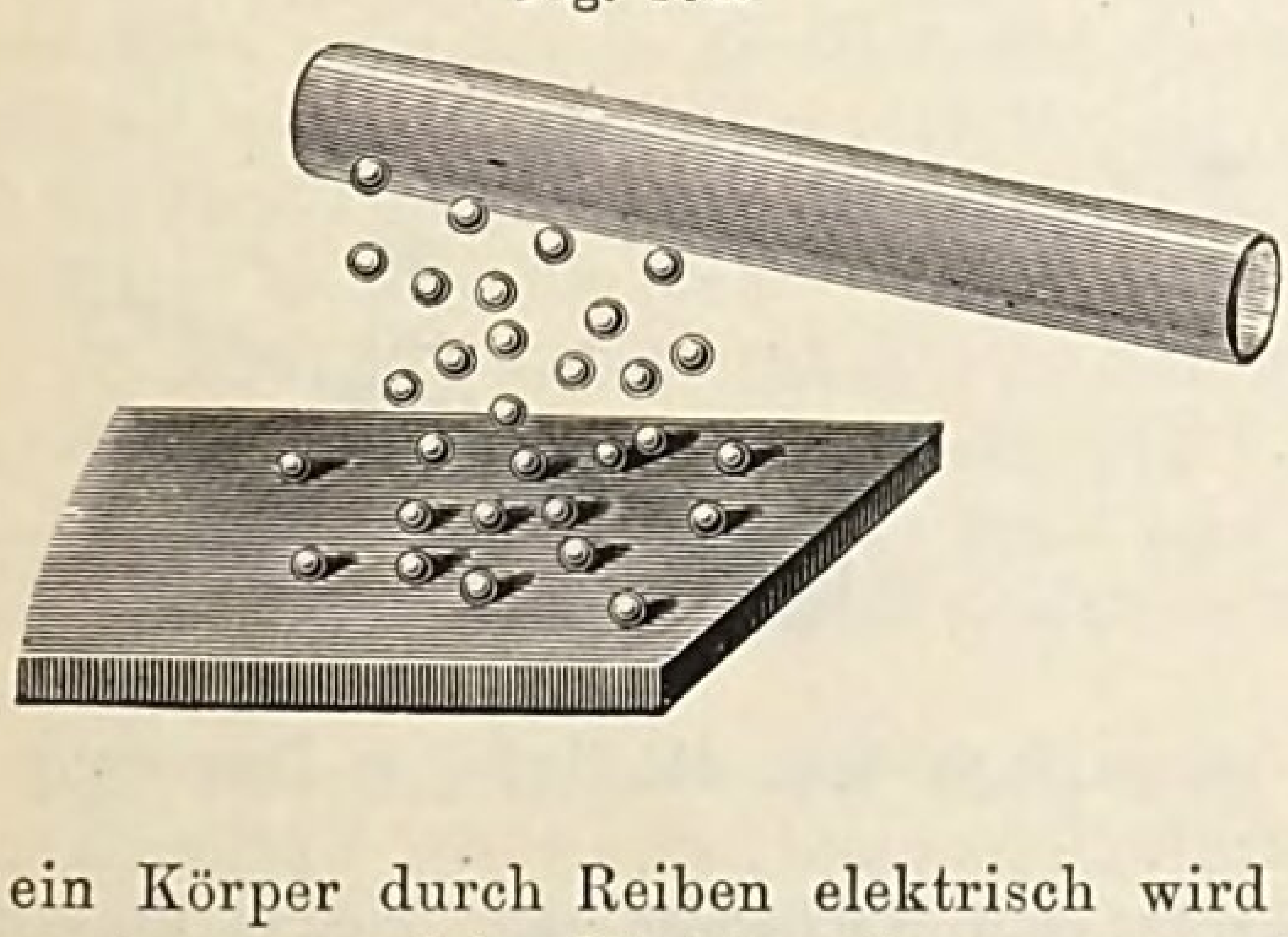
der Oberfläche berechnen lässt. Es geht aus der Gauss'schen Darstellung hervor, dass man, um die magnetischen Erscheinungen zu erklären, nur der Erdkruste magnetische Eigenschaften zuzuschreiben braucht. Die Thatsache, dass der Erdmagnetismus von der Sonnenwärme abhängig ist, lässt aber diese Annahme nicht bloss möglich, sondern sogar wahrscheinlich erscheinen. Zur Erklärung des Magnetismus der Erdkruste kann man entweder mit Moser dem Materiale derselben Eisenmagnetismus zuschreiben oder man kann den Magnetismus als die Wirkung elektrischer Ströme auffassen. Eine Entscheidung über diese Annahmen ist bisher noch nicht möglich gewesen.

Zweites Capitel.

Die Erscheinungen der elektrischen Spannung.

Fundamentalversuche, Elektrisirung durch Reibung. 47
Im gewöhnlichen Zustande zeigen die festen Körper durchaus nicht die Eigenschaft, leichte Partikelchen, wie Goldflitter, Sägespäne, Papierschnitzel, Kügelchen von Hollundermark etc. anzuziehen. Wenn man aber mit Wollen- oder Seidenzeug einen Glasstab, eine Stange Schwefel oder Siegellack, ein Stück Bernstein etc. reibt, so erlangen diese Körper sogleich jene merkwürdige Eigenschaft. Die anziehende Kraft ist oft so gross, dass schon in einer Entfernung von mehreren Centimetern Kügelchen von Hollundermark aufgezogen werden (Fig. 102). Die Ursache dieses Phänomens nennt man Elektricität, nach dem griechischen Worte ἤλεκτρον, welches Bernstein bedeutet, an welchem die griechischen Philosophen zuerst diese merkwürdige Eigenschaft beobachtet hatten.

Fig. 102.



Um mit Sicherheit entscheiden zu können, ob ein Körper durch Reiben elektrisch wird oder nicht, wendet man Apparate an, welche Elektroskope genannt werden.

Das einfachste Elektroskop ist das elektrische Pendel (Fig. 103 a. f. S.). Es besteht aus einer kleinen Kugel von Hollundermark, welche an einem feinen leinenen Faden aufgehängt ist. Wenn man einen Körper prüfen will, so nähert man ihn dem Kügelchen; wird es angezogen, so ist der Körper elektrisch, wird es aber nicht angezogen, so ist er

entweder nicht elektrisch, oder seine Elektricität ist doch zu schwach, um hier eine Wirkung hervorzubringen.

Die elektrische Nadel (Fig. 104) ist ebenso empfindlich als das elektrische Pendel. Sie besteht aus einem Messingdrahte, welcher in zwei metallischen Kugeln endigt. In der Mitte des Drahtes befindet sich ein Stahl- oder Achathütchen, welches auf einer feinen Spitze ruht. Eine

Fig. 103.

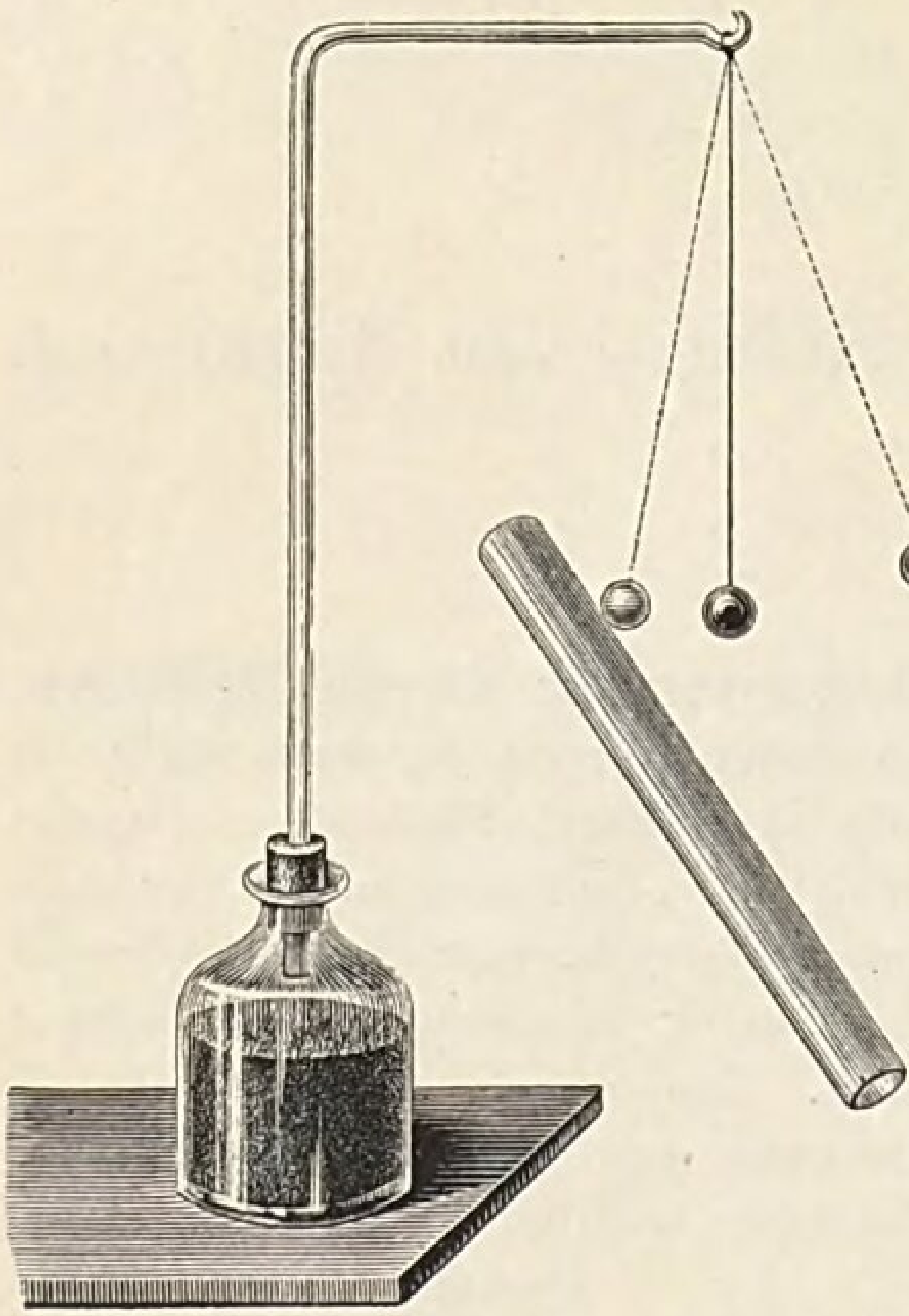


Fig. 104.

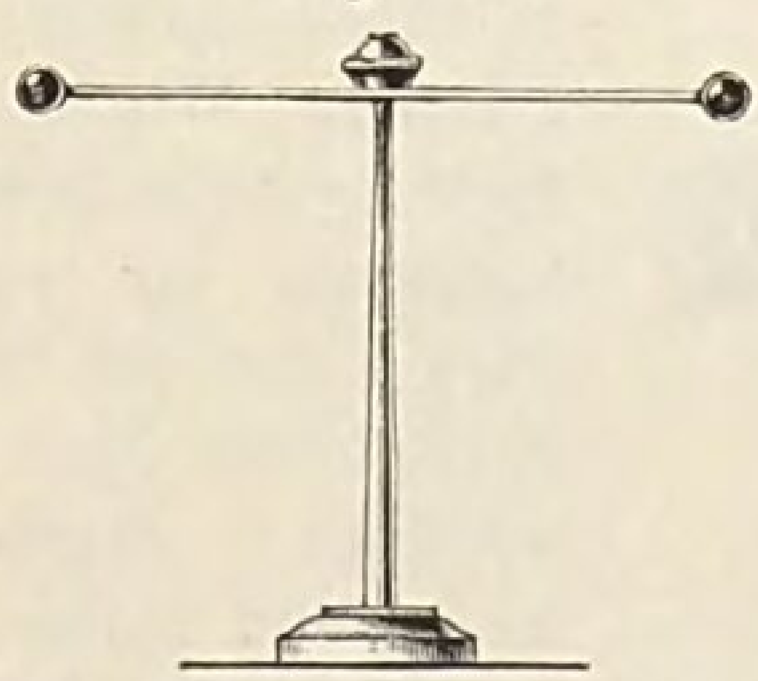
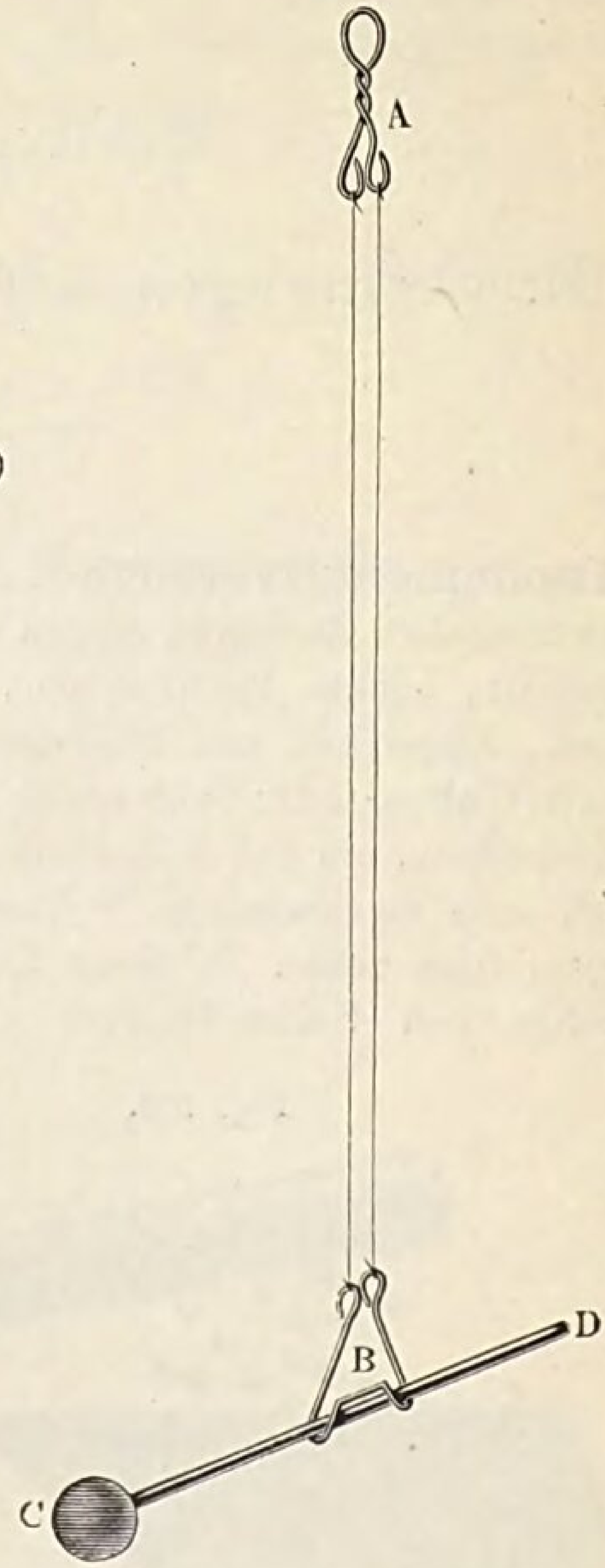


Fig. 105.



geringe elektrische Kraft reicht schon hin, die Nadel in Bewegung zu setzen.

Ein für Vorlesungszwecke zum Nachweise sehr kleiner Elektricitätsmengen besonders gut geeigneter Apparat ist das Bifilarelektroskop von v. Beetz. An die Doppelöse *A* (Fig. 105), sind zwei lange Fäden angebunden, an welchen ein Haken *B* aus Aluminiumdraht hängt. In diesen wird ein Schellackstäbchen *D* von $1^1/_2$ bis 2 mm Dicke eingelegt, welches an dem einen Ende ein Hollundermarkkügelchen *C* trägt. Da

die Directionskraft dieser Bifilaraufhängung eine sehr geringe ist, so wird die Gleichgewichtslage schon durch sehr geringe Kräfte gestört.

Für Vorlesungsversuche vor einem grösseren Auditorium verwendet man statt der Hollundermarkelektroskope solche mit weiterhin sichtbaren Ballons aus Papier, Collodium etc.

Mit Hülfe dieser Apparate kann man untersuchen, inwiefern die verschiedenen Körper durch Reiben elektrisch werden oder nicht. Man findet, dass alle Harze, Bernstein, Schwefel, Glas etc. durch Reiben stark elektrisch werden; Edelsteine, Holz, Kohle geben selten einige Spuren von Anziehung; Metalle endlich scheinen auf den ersten Versuch durch Reiben gar nicht elektrisch gemacht werden zu können, denn man mag einen Metallstab, den man in den Händen hält, noch so stark reiben, man erhält an allen diesen Apparaten auch nicht die mindesten Spuren von Anziehung. Man theilte danach alle Körper in zwei grosse Classen; in solche, welche durch Reiben elektrisch werden, und solche, welche diese Eigenschaft nicht haben. Erstere nannte man idioelektrische, letztere anelektrische Körper.

Leiter und Nichtleiter der Elektricität. Man war früher der Meinung, dass die Körper, welche man mit dem Namen der anelektrischen bezeichnet hatte, auf keinerlei Weise in den elektrischen Zustand versetzt werden könnten. 48

Ein englischer Physiker, Gray, machte im Jahre 1727 die Entdeckung, dass ein mittelst eines Korkstopfens in das offene Ende einer Glasröhre eingesteckter, aus derselben hervorragender Metalldraht und eine an denselben angehängte Metallkette ihrer ganzen Ausdehnung nach elektrisch wurden und die Eigenschaft erhielten, leichte Körperchen anzuziehen, sobald man die Glasröhre durch Reiben elektrisch machte. Dadurch war bewiesen, dass die Metalle nicht nur den elektrischen Zustand anzunehmen, sondern dass sie ihn auch fortzuleiten im Stande sind.

Dieselbe Eigenschaft haben aber alle anelektrischen Körper; man nannte sie deshalb Leiter der Elektricität. Die idioelektrischen Körper dagegen sind keine Leiter, denn wenn man z. B. einen Glasstab durch Reiben an einem Ende elektrisch macht, so zeigt das andere Ende keine Spur von Anziehung.

Es geht daraus auch hervor, dass die Seidenfäden, der Glasstab Nichtleiter der Elektricität, dass sie Isolatoren sind. Ein Leiter der Elektricität kann also nur so lange elektrisch bleiben, als er isolirt, d. h. von lauter Nichtleitern umgeben ist. Auch die Luft ist ein Isolator, denn sonst würde die Elektricität von dem Metalle augenblicklich durch die Luft abgeführt werden.

Gewöhnliches Wasser und, wie es scheint, auch Wasserdampf sind relativ gute Leiter, denn es verliert sich die Elektricität, welche auf

einem isolirten Leiter bei trockener Luft lange haftet, sehr schnell, wenn die Luft feucht ist.

Die besten Isolatoren werden Leiter, wenn sich Wasserdampf auf ihnen niederschlägt. Es ist deshalb für den Erfolg elektrischer Versuche von der grössten Wichtigkeit, Glasfüsse, Harzstangen etc., welche einen Leiter isoliren sollen, durch Erwärmen und Reiben gehörig trocken zu machen.

Auch der menschliche Körper leitet die Elektricität verhältnissmässig gut. Dies ist denn auch der Grund, warum eine Metallstange, die man in der Hand hält, durch Reiben nicht elektrisch wird; alle Elektricität nämlich, welche man durch das Reiben erzeugt, wird sogleich durch den menschlichen Körper wieder abgeführt.

Absolute Nichtleiter der Elektricität giebt es keine; man sollte also nur von guten und schlechten Leitern sprechen. Jene Körper, welche in ihrem Verhalten zwischen beiden stehen, werden auch Halbleiter genannt. Wir geben nachfolgend eine Tabelle der bekannteren Leiter, Halbleiter und Nichtleiter, wobei die aufgeführten Stoffe in der Reihenfolge von den besten zu den schlechtesten Leitern geordnet sind:

Leiter	Halbleiter	Nichtleiter
Metalle	Alkohol	Trockene Oxyde
Kohle	Aether	Fette Oele
Graphit	Glaspulver	Asche
Säuren	Schwefelblumen	Eis bei — 25°
Salzlösungen	Trockenes Holz	Phosphor
Seewasser	Marmor	Kreide
Fluss- und Quellwasser	Papier	Kautschuk
Regenwasser	Stroh	Aetherische Oele
Schnee (nass)	Eis bei 0°	Porcellan
Lebende Vegetabilien		Gut getrocknete Vegetabilien
Lebende animalische Theile		Leder, Pergament
Lösliche Salze		Federn, Haare, Wolle, Seide
Leinen		Edelsteine, Glimmer, Glas
Baumwolle		Wachs, Paraffin
		Schwefel
		Harze

Ausser durch einen Gehalt oder Beschlag von Feuchtigkeit kann die Leitungsfähigkeit auch durch die Beschaffenheit der Oberfläche beeinflusst sein, so zwar, dass Körper, welche bei polirter Oberfläche nicht leiten, zu Leitern oder Halbleitern werden, wenn man ihre Oberfläche matt gemacht hat. Frisch gespaltener Glimmer ist leitend, er verliert diese Leitungsfähigkeit zum Theil nach einigen Tagen, fast vollständig nach Jahren.

Die Wärme wirkt zunächst indirect, indem sie trocknet, wodurch manche Körper ihre Leitungsfähigkeit ganz oder theilweise verlieren. Dagegen werden andere Körper durch Erwärmen leitend, weil sie erweichen oder schmelzen. So z. B. werden Glas, Harze, Wachs leitend, wenn sie bis zum Erweichen erhitzt werden. Auch Eis, welches bei — 25^0 noch Nichtleiter ist, wird Halbleiter, wenn es gegen 0^0 erwärmt wird.

Um dieses Verhalten beim Glase zu zeigen, umwickelt man einen Glasstab mit Draht, so dass ein mehrere Centimeter langes Stück an einem Ende frei bleibt. Hält man nun das andere bewickelte Ende in der Hand, so wird durch Berührung mit dem freien Ende, so lange dasselbe kalt ist, ein Elektroskop nicht entladen. Erhitzt man aber dieses Ende bis zur Drahtspirale auf eine Temperatur von 200 bis 300^0 C. so wird durch dessen Berührung das Elektroskop entladen, und zwar um so rascher, je höher die Temperatur gesteigert worden war. Dabei verhalten sich verschiedene Glassorten sehr verschieden; ja manche Gläser leiten schon bei gewöhnlicher Temperatur in merklicher Weise.

Gase und Dämpfe gehören zu den Isolatoren, so lange sie trocken und staubfrei sind, d. h. so lange sie vom Condensationspunkte entfernt sind. Auch überhitzter Wasserdampf ist als trockener Dampf anzusehen. Wenn in Luft, welche nicht mit Wasserdampf gesättigt ist, die Elektricitätsverluste grösser sind als in trockener, so ist dieses wohl nur der Oberfläche der festen Leiter zuzuschreiben, welche durch Aufnahme von Wasser leitend wird.

Flammen und Rauchsäulen dagegen leiten die Elektricität.

Von den beiden Arten der Elektricität. Im Jahre 1733 49
hat Dufay die wichtige Entdeckung gemacht, dass es zweierlei Arten elektrischen Zustandes giebt, die sich zu einander analog verhalten, wie positive und negative Grössen oder wie Wärme und Kälte. Nähert man eine geriebene Glasstange dem Hollundermarkkügelchen eines Elektroskops, so wird es angezogen, es berührt die Stange, bleibt aber nur einige Augenblicke daran haften, um alsbald abgestossen zu werden. Diese Repulsion rührt von der Elektricität her, welche dem Kügelchen durch die Berührung mit der Stange mitgetheilt worden ist, denn wenn man es mit der Hand berührt, und es dadurch wieder in seinen natürlichen Zustand zurückgeführt hat, wird es von Neuem angezogen und nach der Berührung abermals abgestossen. Dass das abgestossene Kügel-

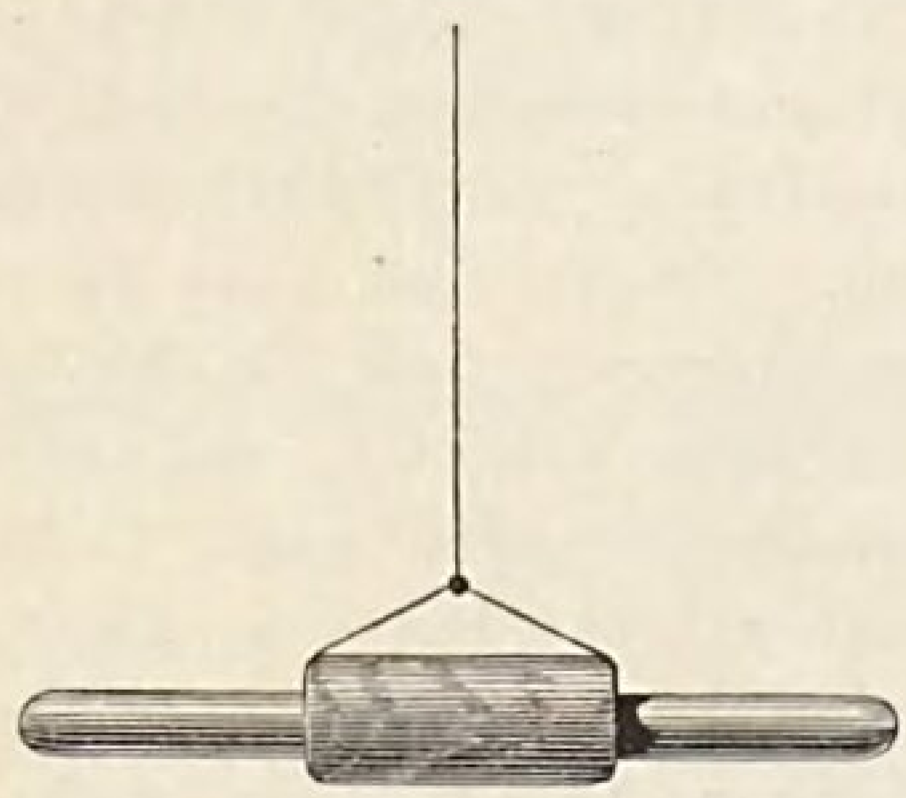
chen wirklich elektrisch ist, geht auch daraus hervor, dass es selbst von Körpern, die sich im natürlichen Zustande befinden (es empfiehlt sich, zu diesem Versuche Leiter zu wählen), angezogen wird.

Wenn man zwei isolirte Pendel nimmt, von denen das eine durch Berührung einer mit Seidenzeug geriebenen Glasstange, das andere durch eine mit Tuch geriebene Schellackstange elektrisch gemacht worden ist, so beobachtet man, dass das von dem Glasstabe abgestossene Kügelchen von der Schellackstange, das vom Schellack abgestossene aber vom Glase angezogen wird.

Der elektrische Zustand des geriebenen Glases ist also nicht identisch mit der des Harzes, weil jedes dasjenige Pendel anzieht, welches die andere abstösst.

Die beiden Elektricitäten hat man mit dem Namen der Glaselektricität und der Harzelektricität bezeichnet. Die Glaselektricität wird auch die positive, die Harzelektricität die negative genannt.

Fig. 106.



Nach Frick kann das erwähnte Verhalten auch auf folgende Weise demonstrirt werden:

Ein ganz dünner Metalldraht oder auch ein ungedrehter Seidenfaden von 60 bis 100 cm Länge trägt unten eine ungefähr 3 cm lange hölzerne Hülse (Fig. 106), in welche man einen Glas- oder Harzstab *b d* einschieben kann. Ein solcher Stab, in der Hülse liegend, kann sich natürlich nur in horizontaler Ebene um die verticale Axe des Fadens drehen. — Wird nun ein durch Reiben positiv elektrisch gemachter Glasstab in die Hülse eingelegt, so wird derselbe von einem zweiten ihm genäherten, auf dieselbe Weise geriebenen Glasstabe abgestossen, während eine geriebene Harzstange den in der Hülse liegenden in horizontaler Ebene leicht drehbaren Glasstab anzieht. — Liegt ein negativ elektrischer Harzstab in der Hülse, so wird er von einem geriebenen Harzstab abgestossen, von einem Glasstab aber angezogen. Eine recht zweckmässige Form dieses Apparats hat Weinhold angegeben *).

Den Umstand, dass zwei gleichartig elektrisirte Leiter sich abstossen, benutzt man zur Construction von feineren und bequemeren Elektroskopen, als die früher beschriebenen sind. Hat man zwei neben einander aufgehängte Pendel schwach positiv elektrisirt, so divergiren sie, berührt man ihre Zuleitung mit einem positiv elektrischen Körper, so vermehrt sich ihre Divergenz, berührt man sie mit einem negativen, so verschwindet die Divergenz. Doch kann dann der negative Ueberschuss neuerdings Divergenz durch negative Ladung hervor-

*) Weinhold, Physik. Demonstr. S. 492.

rufen. Wir werden übrigens später zeigen, dass die blosse Annäherung des zu untersuchenden Körpers genügt, um die Wirkung auf die Pendel hervorzubringen und dadurch die Art des elektrischen Zustandes zu prüfen. Um aus einer solchen Pendelvorrichtung ein brauchbares Elektroskop zu machen, hat man vor Allem dafür zu sorgen, dass die Pendel sich in einem Glasgefässe befinden, damit störende Luftströmungen von ihnen abgehalten werden, und dann, dass das leitende System, welches die Pendel trägt, gehörig isolirt sei.

Bei Franklin's Elektroskop bestanden die Pendel aus zwei einfachen leinenen Fäden. Canton versah diese Fäden mit Korkkügelchen, um sie besser zu spannen. Saussure wandte als elektrische Pendel seines Elektroskops zwei feine Silberdrähte mit unten angesteckten Hollundermarkkügelchen an. Volta ersetzte diese Silberfäden durch gerade, ganz feine Strohhälmchen, und Bennet endlich setzte an die Stelle der Strohhalme zwei schmale Streifen von Blattgold. Neuestens gebraucht man statt dessen Streifen von Aluminiumblech.

Fig. 107.

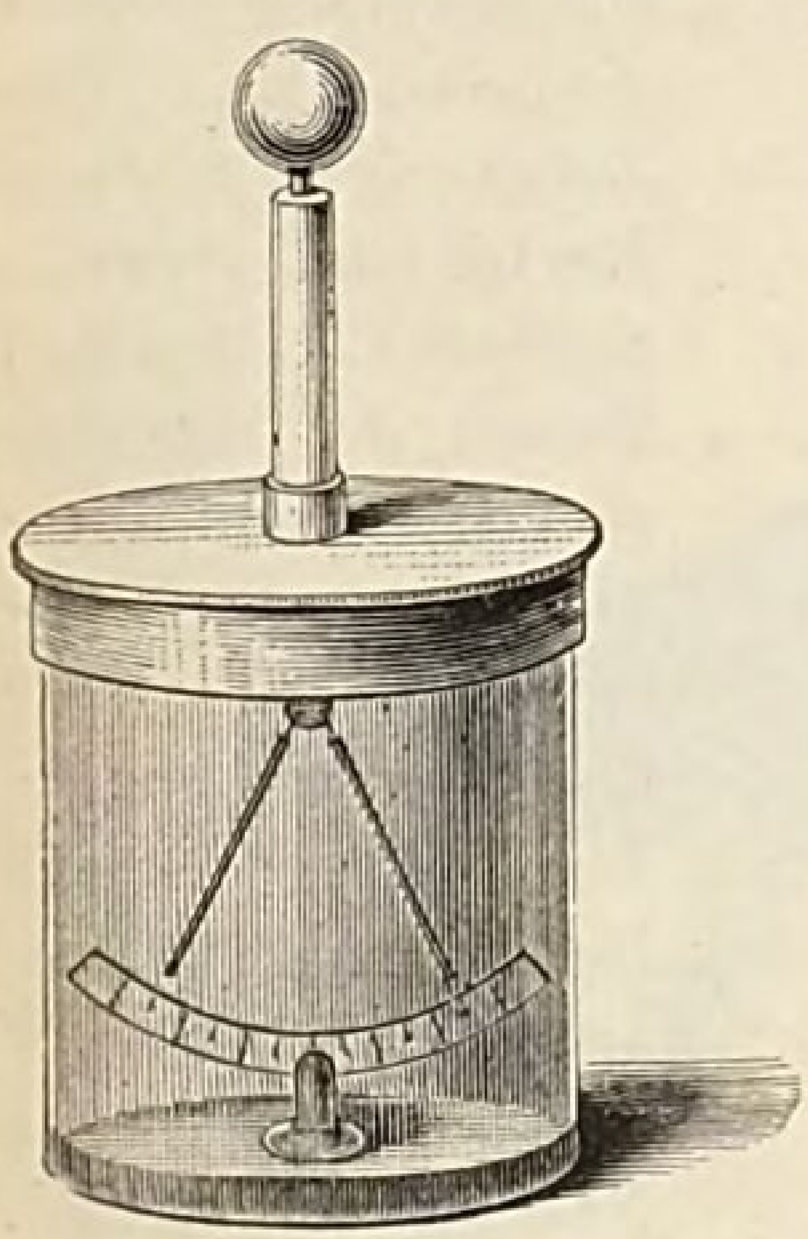


Fig. 108.



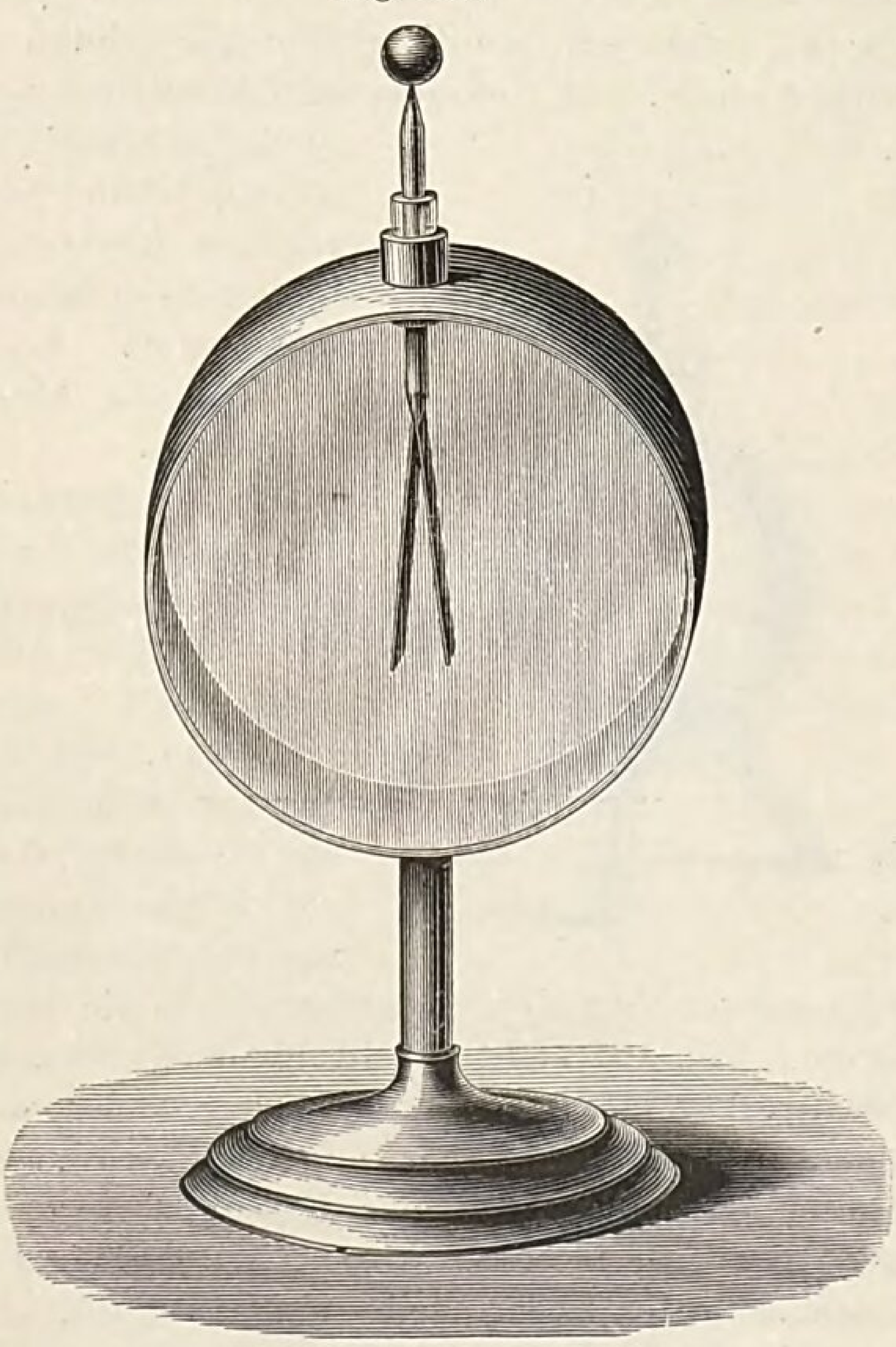
Aus dem Grade der Divergenz der Pendel kann man annähernd auf die Stärke ihrer elektrischen Ladung schliessen, und deshalb nennt man solche Elektroskope auch Elektrometer, und zwar namentlich, wenn sie mit einem Gradbogen versehen sind, an welchem man die Grösse der Divergenz ablesen kann. Fig. 107 stellt ein Strohhalmelektrometer, Fig. 108 ein Goldblattelektroskop in jener Kugelform dar, welche vorzugsweise von verschiedenen Berliner Mechanikern angefertigt wird. Um den Hals eines 8 cm weiten Glasballons ist eine Messingfassung mit innerlichem Schraubenzuge gekittet; in diese Fassung wird eine dicke Messingscheibe mit zwischengelegter Lederscheibe eingeschraubt. Die Schraube hat ein 6 mm weites Loch, in welches der 2 mm dicke, 5 cm lange Zuleitungsdraht mit Schellack eingekittet wird. Zu diesem Zwecke umgiebt man den Draht an der geeigneten Stelle mit einer dicken Lage von Schellack, rollt diese auf Glas zu einem Cylinder aus und steckt dann den Draht mit dieser Schellackhülse in das Loch der heissen Messingplatte. Innerhalb des Ballons endigt der Draht mit einer Zuschärfung, an welcher die 3 cm langen Goldblättchen befestigt sind, welche

selbst bei der stärksten Divergenz die Glaswand nicht berühren können. Den Flächen der Goldblättchen gegenüber befinden sich an der Aussenseite des Ballons Stanniolstreifen, welche die Messingfassung mit dem Fusse des Elektroskops verbinden, deren Zweck später erklärt werden soll. Der Ballon muss innerlich sehr trocken sein und wird deshalb mässig erwärmt, ehe man die Messingplatte luftdicht aufschraubt.

Ein sorgfältig verfertigtes Elektroskop dieser Art ist im Stande, eine mässige Ladung Stunden lang zu halten.

Um einem grösseren Auditorium die Experimente mit dem Elektroskop durch Projection vorzuzeigen, eignet sich am besten die v. Beetz'sche Form dieses Apparates (Fig. 109). Derselbe besitzt ein cylindrisches Metallgehäuse, welches mit Glasscheiben verschlossen ist. Die Zuleitung ist mittelst Hartgummi sorgfältig isolirt. Ueber den Zweck der metallischen Umhüllung dieses letzteren Elektroskopes, sowie über die zweckmässigste Behandlung dieser Instrumente überhaupt können wir erst weiter unten das Nähere besprechen.

Fig. 109.



Eine weitere wichtige Thatsache ist die, dass beim Reiben zweier Körper an einander nie eine Elektricitätsart allein, sondern stets beide und zwar, wie später gezeigt werden wird, in gleichen Mengen auftreten. Es wird also stets der eine Körper positiv und gleichzeitig der andere negativ elektrisch. Um dies nachzuweisen, hat man nur nöthig, jenen Körper, dessen Elektricität geprüft werden soll, zu isoliren, vorausgesetzt, dass er nicht selbst schon ein Isolator ist.

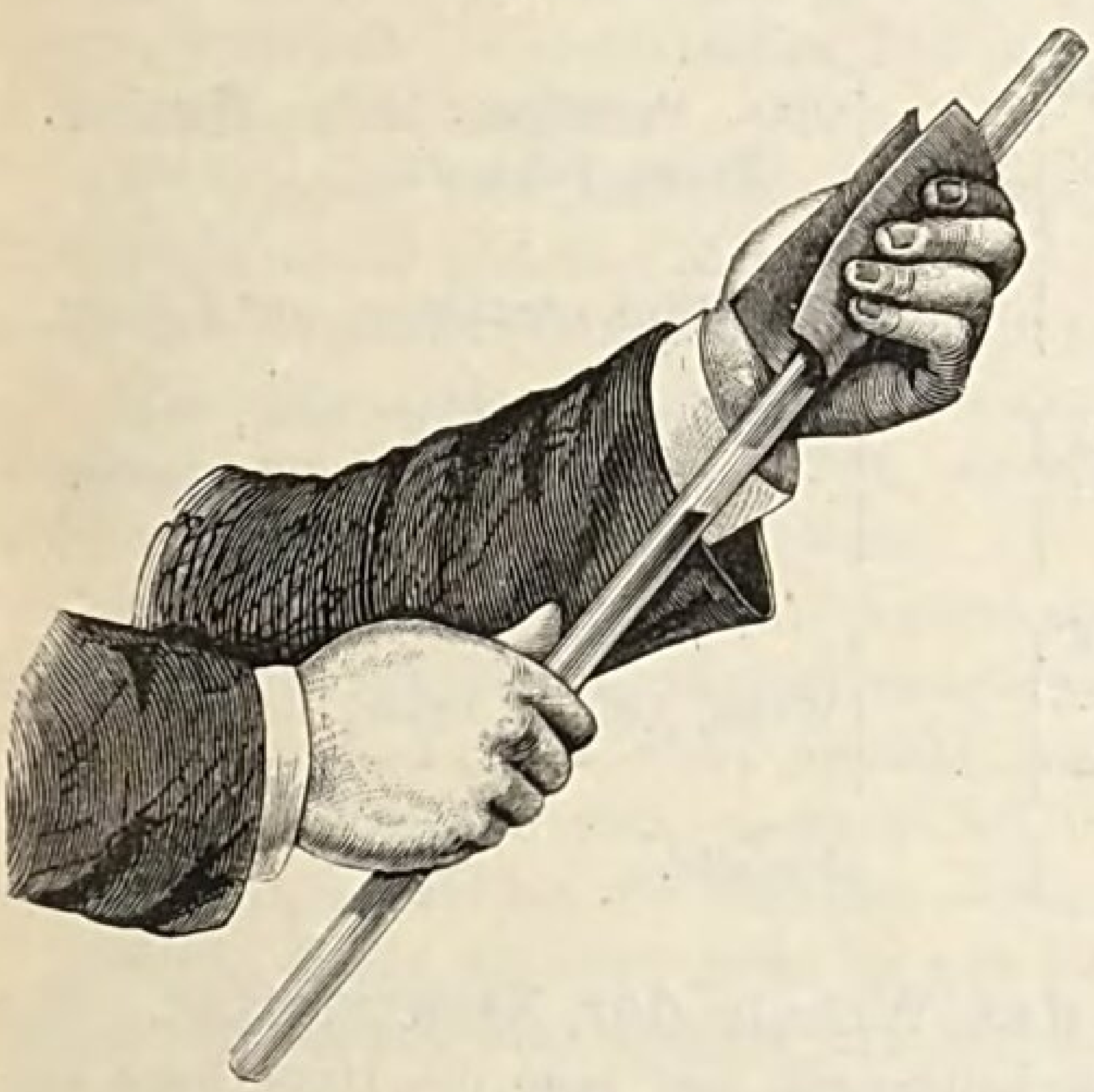
Reibt man z. B. einen Glasstab mit einer etwas dicken Platte von

vulcanisirtem Kautschuk (Fig. 110), so stösst dieselbe nachher ein Hollundermarkkügelchen, das man positiv geladen hatte, ab, während die geriebene Seite des Kautschuks dasselbe lebhaft anzieht; umgekehrt wird ein negativ geladenes Kügelchen von dem Stabe angezogen und vom Kautschuk abgestossen. Befestigt man eine Zinkplatte an einer Siegellackstange, welche als isolirender Griff zu dienen hat, so kann man zeigen, dass das Zink durch Reiben an einem Stücke Filz negativ, der letztere positiv elektrisch wird.

Derlei Versuche ergaben ferner, dass ein und derselbe Körper bald positiv, bald negativ elektrisch werden kann, je nachdem er mit dem einen oder anderen Körper gerieben wird. So z. B. wird Glas positiv elektrisch beim Reiben mit Amalgam, welches auf Leder aufgestrichen ist, dagegen oft negativ elektrisch beim Reiben mit Pelzwerk oder Wolle.

Es kommt hierbei weniger auf die stoffliche Natur des Körpers als auf seine Oberflächenbeschaffenheit an. Heintz hat gefunden, dass ein Glasstab, welchen man mehrmals durch die Flamme einer Spirituslampe gezogen hat, bei schwachem Reiben mit Tuch negativ elektrisch wird, während sich bei stärkerem Reiben die positive Elektricität wieder einstellt. Die Weingeistflamme wirkt hier wohl nur insofern, als sie das Glas von der Luftschicht befreit, welche gewöhnlich auf der Oberfläche desselben condensirt ist.

Fig. 110.



Wenn man die eine Längenhälfte eines Glasstabes matt schleift, der anderen aber die natürliche Oberfläche lässt, so zeigt das matte Ende, mit Wolle gerieben, häufig negative Elektricität, während das glatte Ende unter denselben Umständen positiv wird. Mit Amalgam gerieben, werden beide Enden des Glasstabes positiv.

Greiss hat gefunden, dass Siegellack mit Zunder oder Korkholz gerieben positiv elektrisch wird.

Nach Poggendorff können selbst diejenigen Isolatoren, welche durch Reiben mit den meisten organischen Substanzen sehr stark negativ elektrisch werden, wie z. B. Horngummi (Kammmasse) und das durch seine Entzündlichkeit bekannte Pyroxylin-Papier (Pyropapier), eine starke Ladung positiver Elektricität annehmen, wenn sie an einem mit Kienmayer'schem Amalgam überzogenen Stück Leder gerieben oder vielmehr sanft gestrichen werden.

Ein auf diese Weise positiv gemachter Streifen Pyropapier bildet ein ebenso empfindliches Elektroskop für positiv elektrische Körper, wie ein zwischen den Fingern durchgezogener und dadurch negativ elektrisch gemachter Streifen dieses Papiers es für negativ elektrische Körper ist.

Poggendorff fand ferner, dass Horngummi, Guttapercha, Kautschuk, Colophonium, Schellack, Schwefel, Seide, Pyropapier, Collodium etc. durch Reiben mit den sogenannten elektronegativen Metallen (Platin, Gold, Silber etc.) positiv elektrisch gemacht werden, während die elektropositiven Metalle (Zink, Cadmium, Eisen etc.) dieselben Substanzen in den negativen Zustand versetzen.

Riess giebt nachfolgende Tabelle über dieses Verhalten. Die links aufgeführten Körper werden positiv elektrisch, wenn sie mit den in gleicher Höhe rechts aufgeführten Körpern gerieben werden, welche letzteren dann negativ elektrisch werden.

+	−
Pelz der Raubthiere, struppiges Menschenhaar (der Länge nach gerieben).	Glas, Porcellan, Holz, Metalle, Harze, Schwefel.
Glas.	Zinn-Zink-Amalgam auf Leder.
Pelz, Wolle, Leinen, Seide, Papier, Metalle.	Colophonium, Siegellack, Schellack, Bernstein, Schwefel, Kautschuk.
Diamant, Topas, Oxinit, Bergkrystall, Kalkspath, Glimmer, polirtes Glas.	Wolle, Leinen, Seide, Leder.
Glas, Seide.	Metalle.

50 **Vorstellungen über das Wesen der Elektricität.** Zur Erklärung der elektrischen Erscheinungen hat man die Hypothese aufgestellt, dass es zwei besondere imponderable Fluida gebe, welche die Eigenschaft haben, dass die Theilchen desselben Fluidums sich gegenseitig abstossen, während die Theilchen des einen Fluidums anziehend auf die des anderen wirken.

Dieser Annahme steht die Thatsache entgegen, dass man durch Reiben zweier Körper eine unbegrenzte Menge beider Elektricitätsarten entwickeln kann, ohne dass je eine Erschöpfung zu beobachten wäre. So wie uns die analoge Thatsache bei der Wärmeentwickelung durch Reibung veranlasst hat, die Ansicht fallen zu lassen, dass die Wärme etwas Stoffliches sei, so werden wir auch genöthigt, die Hypothese der elektrischen Fluida aufzugeben. Dies hindert uns aber nicht, die oft bequemere Ausdrucksweise dieser Hypothese einstweilen beizubehalten, wie dies ja auch in der Wärmelehre geschieht. Wir sprechen also noch immer

von den Elektricitäten, als wenn es Fluida wären, welche „strömen, abfliessen, sich ausbreiten“ und so weiter. Sollte es, wie zu hoffen ist, einstens gelingen, diese Vorstellung durch eine richtigere zu ersetzen, so werden die beobachteten Thatsachen und abgeleiteten Gesetze deshalb nicht ihre Gültigkeit verlieren, es wird nur nöthig werden, die in die Ausdrucksweise der alten Hypothese gefassten Thatsachen und Gesetze in die Sprache der neuen Hypothese zu übertragen. Nach der bisherigen Vorstellungsweise befindet sich ein Körper im unelektrischen Zustande, wenn er gleich viel von jedem Fluidum enthält, so dass sich die in ihm enthaltenen, mit einander verbundenen Fluida gegenseitig in ihren Wirkungen neutralisiren. Ein Körper ist aber elektrisch, wenn er einen Ueberschuss des einen oder des anderen Fluidums enthält.

Die elektrischen Fluida wären demnach in ihren Eigenschaften vielfach den supponirten magnetischen ähnlich; ein wesentlicher Unterschied fände aber darin statt, dass die magnetischen Fluida in den Eisen- oder Stahlpartikelchen gleichsam eingeschlossen nicht aus denselben heraustreten, während die elektrischen Fluida frei von einem Körper zum anderen übergehen können.

Es begreift sich hiernach auch, warum beim Reiben immer beide Elektricitäten in gleicher Menge entwickelt werden, da sie sonst vorher nicht den neutralen Zustand hergestellt hätten.

Diese dualistische Ansicht von der Existenz zweier Elektricitäten wurde zuerst von Symmer, 1759, ausgesprochen und seine Anhänger werden als Dualisten bezeichnet.

Aepinus und Franklin haben aber schon 1750 eine davon abweichende unitarische Ansicht entwickelt, deren Vertreter demgemäss Unitarier heissen. Da diese Ansicht, nachdem sie lange Zeit in den Hintergrund getreten war, neuerer Zeit wieder mehr an Bedeutung gewonnen hat, so wollen wir dieselbe etwas näher erklären.

Nach dieser Ansicht giebt es nur ein einziges elektrisches Agens, ebenso wie es nur eine einzige Art Wärme giebt. Das, was man negative Elektricität nennt, entspräche in der Wärmelehre der Kälte, das heisst dem Wärmezustande eines Körpers unterhalb eines angenommenen Nullpunktes der Temperatur. So wie ein kalter Körper nur weniger Wärme, aber doch nichts wesentlich Anderes enthält, als dieselbe Wärme, die ein warmer Körper in höherem Maasse enthält, so enthält nach der unitarischen Ansicht jeder Körper von derselben Elektricität weniger oder mehr. Auch die Erde mit sammt allen Körpern an ihrer Oberfläche enthält von dieser Elektricität und zwar ist dieselbe für gewöhnlich so vertheilt, dass sie vollständig im Gleichgewichte sich befindet und demnach nicht von einem Körper zum anderen strömt. Von jedem Körper, der so geladen ist, dass er mit der Erde im Gleichgewicht steht, sagen wir, er sei neutral oder unelektrisch. Wenn wir zwei solche Körper reiben, so wird Elektricität von dem einen auf den anderen getrieben. Der letztere, stärker geladene, heisst dann positiv elektrisch,

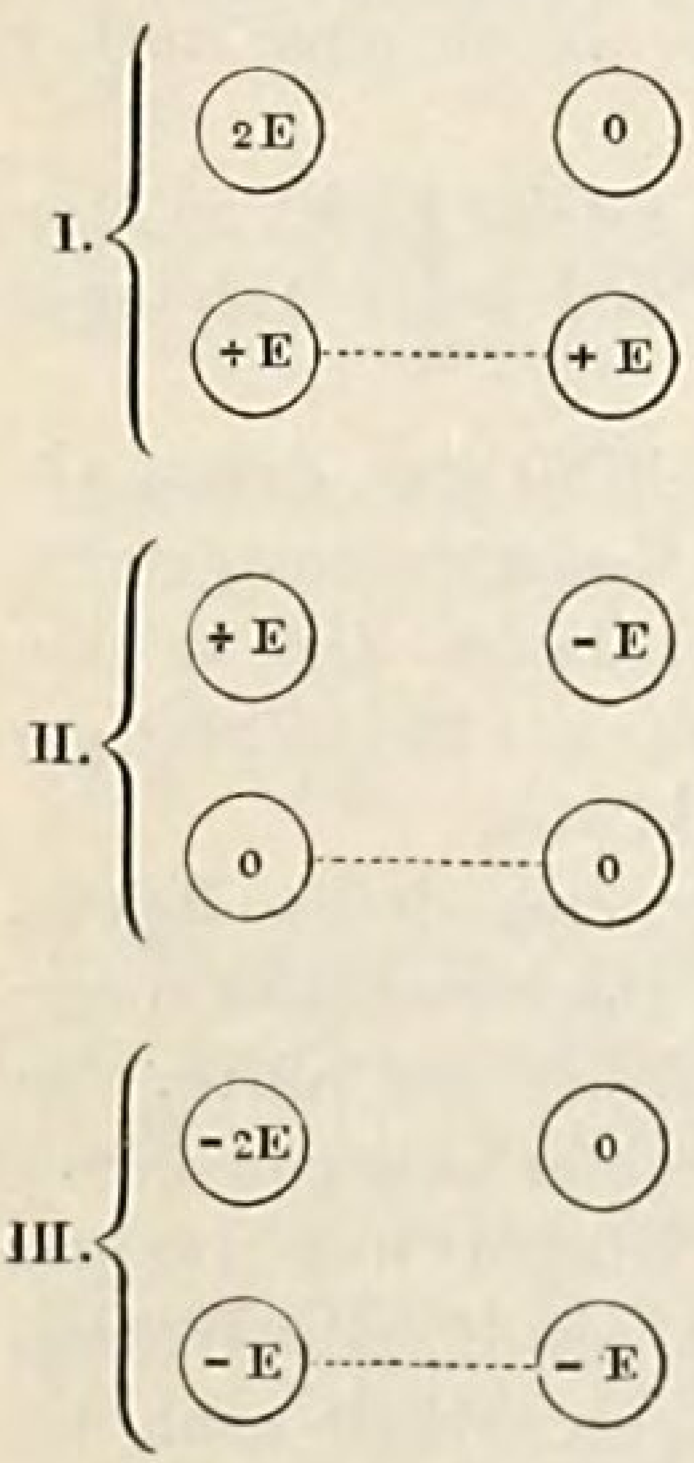
der erstere, schwächer geladene, negativ elektrisch*). Lassen wir den Ueberschuss des einen Körpers auf den anderen, der Mangel hat, zurückfliessen, so stellt sich die normale Ladung, d. h. der neutrale Zustand, den wir den unelektrischen nennen, wieder her.

Eine Folgerung dieser unitarischen Theorie ist das Princip der Erhaltung der Elektricität, welches von G. Lippmann und von S. P. Thompson formulirt wurde. Dasselbe besagt, dass die scheinbare Erzeugung und Vernichtung von Elektricität in Wahrheit nur eine Uebertragung von Elektricität ist, welche dabei in ihrer Quantität unveränderlich bleibt.

Worin das Wesen der Elektricität besteht, ist noch unbekannt; doch sind Anhaltspunkte vorhanden, welche vermuthen lassen, dass dieselbe zu dem nämlichen Medium, welches den Lichterscheinungen zu Grunde liegt, dem Lichtäther, in naher Beziehung stehe.

51 **Elektrisirung durch Mittheilung.** Wir haben bereits durch das Experiment gezeigt, dass sich der elektrische Zustand durch Berührung von einem Körper auf einen anderen übertragen lässt und die Erörterungen des vorigen Paragraphen lassen uns über den Vorgang hierbei nähere Vorstellungen gewinnen, welche je nach dem dualistischen oder unitarischen Standpunkte unter Umständen verschieden sich darstellen.

Fig. 111.



Nehmen wir an, zwei gleiche Metallkugeln werden einander isolirt gegenüber gestellt (Fig. 111 I), die eine, links, werde mit einer positiven Elektricitätsmenge, welche nach irgend einem Maasse gemessen $+ 2E$ betrage, geladen, die andere sei im neutralen Zustande. Wir verbinden dann beide Kugeln durch einen isolirten Draht und nehmen denselben wieder fort. Thatsächlich enthält dann jede der beiden Kugeln die Elektricitätsmenge $+E$. Nach beiden Standpunkten wird man sich einfach vorstellen, dass von den $+ 2E$ die Hälfte hinübergeflossen und dadurch das Gleichgewicht hergestellt worden sei.

Zum anderen Male geben wir den beiden Kugeln die Ladungen $+E$ und $-E$ (Fig. 111 II). Nach der Verbindung zeigen thatsächlich beide Kugeln keinen elektrischen Zustand mehr. Nach der dualistischen Anschauung sind die $+E$ und die $-E$ einander entgegengeflossen und haben sich neutralisirt, d. h. gegenseitig vernichtet. Dass die

*) Dabei wird vorausgesetzt, dass die allein existirende Elektricität diejenige ist, welche wir jetzt die positive nennen. Wir werden später zeigen, dass leider das Umgekehrte richtig zu sein scheint.

beiden Kugeln, wenn wir sie dann mit der Hand berühren, an diese keine Elektricität mehr abgeben, kommt also daher, dass weder die Kugeln, noch die Hand Elektricität besitzen. Nach der unitarischen Ansicht ist der Ueberschuss $+ E$ allein hinübergewandert, um den Mangel $- E$ zu decken, wobei die Elektricität in ihrer Menge unverändert blieb.

Im dritten Falle denken wir uns die eine Kugel mit $- 2 E$ geladen, die andere unelektrisch (Fig. 111 III). Nach der Verbindung scheinen beide mit $- E$ geladen. Nach der dualistischen Ansicht ist einfach $- E$ hinüber geflossen. Nach der unitarischen ist vielmehr $+ E$ herüber geflossen, wodurch einerseits der Mangel $- 2 E$ bis auf die Hälfte $- E$ gedeckt wurde, während auf der anderen Kugel derselbe Mangel $- E$ entstand.

Wie man sieht, führen zwar beide Grundansichten zu einer Erklärung der Thatsachen, sie unterscheiden sich aber dadurch, dass die eine als Nullpunkt des elektrischen Zustandes den Zustand der Erdoberfläche nimmt, während die andere einen absoluten Nullpunkt voraussetzt.

Die Analogie mit der Wärme macht dies besonders klar. Ein Körper von 2^0 C. und ein eben solcher von $- 2^0$ C. in Berührung gebracht, kommen beide auf 0^0 C. Nach der dualistischen Ansicht wird die Wärme des ersten durch die Kälte des zweiten neutralisirt oder vernichtet, nach der unitarischen Ansicht ist die Wärme in ihrer Menge unverändert geblieben und nur gleich vertheilt worden. Nach der ersten Ansicht gilt der Eispunkt als Nullpunkt, wo es weder Wärme noch Kälte giebt, nach der zweiten ist auch beim Eispunkt nur Wärme vorhanden und der wirkliche Nullpunkt tiefer gelegen. Die unitarische Ansicht verdient offenbar den Vorzug.

Bei der Berührung mit einem elektrisirten Körper nehmen schlechte Leiter die Elektricität nur unmittelbar an der berührenden Stelle auf, sie verbreitet sich nicht über ihre ganze Ausdehnung. Ebenso verliert ein elektrischer Isolator, an einer Stelle berührt, nur unmittelbar hier etwas Elektricität, die ganze nicht berührte Oberfläche bleibt nach wie vor elektrisch. Es lässt sich dies sehr leicht mit einer geriebenen Glas- oder Siegellackstange zeigen. Bei guten Leitern verhält sich die Sache ganz anders. An einem Punkte mit einem elektrischen Körper berührt, verbreitet sich die übergegangene Elektricität über den ganzen Leiter, und wenn man einen isolirten elektrisirten Leiter mit dem Erdboden in leitende Verbindung bringt, so verliert er augenblicklich alle seine elektrischen Eigenschaften.

Auch ohne unmittelbare Berührung kann die Elektricität von einem Körper zum anderen übergehen, und man beobachtet dabei das merkwürdige Phänomen des elektrischen Funkens. Wenn man einem geriebenen Glas- oder Schellackstab einen Metallstab oder den Knöchel eines Fingers nähert, so sieht man ein Fünkchen überspringen und hört dabei ein knisterndes Geräusch. Sehr stark erhält man diese knisternden Funken, wenn man einen Bogen Papier, der auf einer warmen, wo mög-

lich metallischen Unterlage liegt, mit Wollentuch peitscht und dann aufhebt; auf 2 bis 5 cm weit springen alsdann vom Papier die Funken auf den genäherten Finger über. Wenn der elektrisirte Körper metallisch und von bedeutender Oberfläche ist, wie der Conductor der Elektrisirmaschine, so werden die Funken stärker, sie springen unter Umständen schon in einer Entfernung von über 1 m über; ihr Licht ist dann blendend hell, und das Geräusch, welches sie begleitet, sehr stark.

Otto von Guericke, der Erfinder der Luftpumpe, hat zuerst den elektrischen Funken beobachtet. Später zeigte Dufay zur allgemeinen Verwunderung, dass man selbst aus dem menschlichen Körper wie aus dem Conductor der Maschine Funken entlocken könne, wie wir später sehen werden.

Ueber das Wesen des elektrischen Funkens werden wir weiter unten das Nähere mittheilen.

52 **Vorläufige Begriffsbestimmung des elektrischen Potentials und der elektrischen Capacität*).** Die Bewegung und das Gleichgewicht der Elektricität auf den Leitern hängt von einer Grösse ab, die man das elektrische Potential nennt. Wir werden später zeigen, dass für die Fernwirkung der Elektricität dasselbe Gesetz gilt, wie für den Magnetismus, und dass deshalb jene Rechnungen und Constructionen, welche wir in den §§. 27 bis 32 für die Fernwirkung magnetischer Kraftcentra abgeleitet haben, ganz ebenso für elektrische Kraftcentra gelten. Bevor wir dazu gelangen, dem Begriffe des elektrischen Potentials eine mathematische Fassung zu geben, wollen wir, da wir desselben bei den Erörterungen der nächsten Paragraphen nicht entbehren können, durch Heranziehung einer Analogie mit den hydrostatischen Gesetzen eine Vorstellung der Bedeutung dieses Begriffs zu geben versuchen.

Das Wasser hat auf der Erdoberfläche überall das Bestreben, sich so zu vertheilen, dass die Resultirende von Schwerkraft und Fliehkraft senkrecht auf dessen Oberfläche gerichtet ist, weil nur dann Gleichgewicht möglich ist. Eine solche Oberfläche wird eine Niveaufläche genannt. Wäre die Erde ohne Rotation, ganz mit Wasser bedeckt und würde kein anderer Weltkörper auf sie einwirken, so würde die Niveaufläche mit einer Kugelfläche zusammenfallen. Wählt man die Niveaufläche des Meeres, wie es üblich ist, zum Nullpunkt einer Höhenscala, so werden alle Höhen darüber positiv, alle Höhen darunter als Tiefen, d. h. negativ gerechnet.

Wir können diese Höhenscala auf zweierlei Weise einrichten. Entweder wählen wir deren Theilstriche genau äquidistant, z. B. von Meter zu Meter fortschreitend, oder wir wählen deren Abstände so, dass jedesmal eine gleich grosse Arbeit, z. B. ein Kilogrammmeter, erforderlich

*) Das genaue Studium dieses und des nächsten Paragraphen ist zum Verständniss alles Folgenden besonders wichtig.

ist, um ein Liter Wasser um einen Scalentheil zu heben. Diese beiden Theilungen stimmen allerdings sehr nahe mit einander überein, weil innerhalb der uns zugänglichen Höhen auf der Oberfläche der Erde die Schwerkraft sehr nahe constant ist. Dennoch werden bei der letzteren Scala die Theilstriche nach oben immer weiter von einander rücken. Wir wollen uns diese letztere Scala angebracht denken. Um irgend wo für einen Punkt zu ermitteln, welche Höhe nach dieser Scala derselbe besitzt, müssten wir die Arbeit messen, welche aufzuwenden ist, um ein Liter Wasser aus dem Niveau des Meeres bis auf die Höhe des Punktes hinaufzuschaffen, oder wir könnten auch die Arbeit bestimmen, welche ein Liter Wasser leistet, indem es von diesem Punkte wieder zum Meeresniveau zurückströmt. Die so gemessenen Höhen wollen wir Niveauhöhen nennen, die Unterschiede zweier solcher Höhen Niveaudifferenzen.

Ebenso wie nun das Wasser von selbst aus höherem Niveau zu tieferem fliesst und überall dasselbe Niveau herzustellen sucht, indem sowohl Erhebungen über dasselbe, als Depressionen unter dasselbe bestrebt erscheinen, sich auszubreiten, ebenso hat das elektrische Agens das Bestreben, von Punkten, wo es mehr angehäuft ist als an anderen, dahin abzufliessen, wo es weniger hoch steht. Daraus erklärt sich das Bestreben der positiven Elektricität, welche als Ueberschuss, als Elektricitätsberg, aufgefasst werden kann, sich mit der negativen Elektricität, welche als Mangel, als Elektricitätsvertiefung, sich darstellt, auszugleichen. Zwei Berge oder zwei Depressionen werden sich nicht zu noch grösserer Höhe oder Tiefe vereinigen, sondern vielmehr von einander zu entfernen und auszubreiten streben. Analog stossen sich gleichnamige Elektricitäten ab und breiten sich möglichst aus. Das ist natürlich keine eigentliche Erklärung, aber eine Vorstellungsweise, welche auf Grund der unitarischen Ansicht aufgebaut ist.

Die analogen Grössen, welche wir beim Wasser die Niveauhöhe und Niveaudifferenz nennen, bezeichnen wir bei der Elektricität mit Potentialhöhe und Potentialdifferenz. (Man sagt auch „Potentialniveau".) Ausserdem sind Wassermenge und Elektricitätsmenge analoge Begriffe. So wie wir als Nullpunkt des Wasserniveaus das Niveau der auf der Erde im Gleichgewicht ausgebreiteten Wassermassen wählen, so bezeichnen wir die Potentialhöhe der auf der Erde ausgebreiteten Elektricität mit Null.

Nun wollen wir sehen, ob wir auf Grund dieser Analogie die Bedingungen des elektrischen Gleichgewichts voraussagen können.

Werden zwei verbundene Leiter dann im elektrischen Gleichgewicht stehen, wenn sie gleichnamige und gleich grosse Elektricitätsmengen enthalten? Die Antwort muss im Allgemeinen Nein lauten, denn das Wasser steht in communicirenden Gefässen nicht dann im Gleichgewicht, wenn die Wassermengen, sondern wenn die Niveauhöhen gleich sind.

Ebenso stehen verbundene Leiter nur dann im Gleich-

gewicht, wenn das elektrische Potential auf beiden die gleiche Höhe hat*). Wie die Wassermengen von der Weite der Gefässe, d. i. deren Capacität, abhängen, so auch die Elektricitätsmengen von dem Fassungsvermögen, der elektrischen Capacität der Leiter. Bringen wir z. B. eine grössere und eine kleinere isolirte Kugel mit einander in leitende Verbindung, so erfordert das Gleichgewicht, dass die grössere Kugel mehr Elektricität besitze, als die kleinere. Nur bei gleichen Kugeln sind bei Gleichgewicht auch die Elektricitätsmengen gleich, so wie in communicirenden Gefässen von gleicher Capacität die Wassermengen gleich gross sind, welche sich das Gleichgewicht halten**).

Um zu bestimmen, wie hoch das elektrische Potential auf einem Leiter ist, haben wir die Arbeit zu messen, welche die Einheit der positiven Elektricitätsmenge erfordert, um von der Erde, deren Potentialhöhe gleich Null ist, auf den Leiter gebracht zu werden, oder auch die Arbeit, welche die positive Elektricitätseinheit leistet, indem sie vom Leiter auf die Erde abfliesst. Nach welchen Einheiten wir dabei diese Mengen messen und wie wir diese Arbeit bestimmen, soll später gezeigt werden. Hier sei nur bemerkt, dass diese Arbeit auch als Wärme oder eine andere äquivalente Energiemenge auftreten kann. Ebenso messen wir die Potentialdifferenz zweier Leiter, indem wir die Arbeit bestimmen, welche die positive Elektricitätseinheit leistet, indem sie vom Leiter höheren Potentials zu jenem tieferen Potentials abströmt.

Hierbei wird stillschweigend vorausgesetzt, dass das Fassungsvermögen der Leiter so gross sei, dass die Potentialhöhe durch Zufuhr oder Wegnahme einer Elektricitätseinheit nicht merklich geändert werde. Anderenfalls würden wir das arithmetische Mittel der Potentialhöhen vor und nach dem Zu- (Ab-) strömen erhalten.

Nach diesen Auseinandersetzungen könnte es scheinen, dass unter allen Umständen ein positiv elektrischer Körper ein höheres Potential habe als ein nicht elektrischer und dieser ein höheres als ein negativ elektrischer Körper. Dies ist aber nur dann richtig, wenn dieser Körper fern von jeder anderen elektrischen Einwirkung für sich allein vorhanden ist. Im Allgemeinen kann es vorkommen, dass zwei Leiter dasselbe Potential haben und deshalb mit einander im elektrischen Gleichgewichte stehen, obwohl der eine elektrisch, der andere unelektrisch oder entgegengesetzt elektrisch ist. Wir werden bald den Fall kennen lernen, wo

*) Dabei wird vor der Hand von der Contactelektricität ganz abgesehen, sonst müsste der Satz auf gleichartige Leiter eingeschränkt werden.

**) Begriff und Maass der elektrischen Capacität wird im §. 68 näher erörtert werden. Vorläufig genügt zu wissen, dass nach Analogie der Gleichungen

Wassermenge = Querschnitt × Höhe
Wärmemenge = Capacität × Temperatur

die Beziehung gilt:

Elektricitätsmenge (Ladung) = Capacität × Potential.

auf demselben Leiter am einen Ende positive, am anderen Ende negative Elektricität vorhanden ist und doch überall gleiche Potentialhöhe herrscht.

Hier scheint es also, als ob uns die Analogie mit den hydrostatischen Gesetzen im Stiche lasse. Das ist aber nicht der Fall. Wir können ganz analoge Fälle auch dort antreffen. Wenn das Wasser auf der Erdoberfläche nicht allein der Anziehung der Erde, sondern auch noch jener des Mondes ausgesetzt ist, so wird das Gleichgewicht gestört und tritt erst wieder ein, nachdem eine andere Vertheilung der Wassermassen erfolgt ist, bei welcher ein Theil der letzteren sich über das frühere Nullniveau erhoben, ein anderer Theil sich unter dasselbe gesenkt hat. Würde die Erde nicht rotiren, und bliebe der Mond ihr gegenüber an derselben Stelle, so blieben auch die Stellen für Fluth und Ebbe, d. h. die Stellen für positiven und negativen Wasserstand, unverrückt. Die Wasseroberfläche würde nach Eintritt des Gleichgewichts wiederum die Eigenschaft haben, dass die resultirende Kraftrichtung überall auf derselben senkrecht steht, und dass Transport längs der Oberfläche keine Arbeit erfordert. Die neue Oberfläche hätte also wieder den Charakter einer Niveaufläche.

Betrachten wir ein communicirendes Gefäss, Fig. 112; denken wir uns dasselbe mit dem Meere in Communication gesetzt, worauf es sich bis zur Horizontalebene hh' mit Wasser füllt. Diese Höhe werde mit Null bezeichnet. Nun denken wir uns von der Seite her auf das Wasser eine Anziehung ausgeübt. Wir könnten uns diese Anziehungskraft durch die sogenannte Fliehkraft ersetzt denken, welche entsteht, indem wir das Gefäss um die verticale Axe gg', Fig. 113, rotiren lassen. Sofort nimmt die Oberfläche des Wassers eine neue Gestalt an. Sobald bei constanter Rotation wieder Gleichgewicht eingetreten ist, findet sich ein negativer Wasserstand in dem einen, ein positiver Stand in dem anderen Schenkel. Die Fläche $abcd$ wird von den Resultirenden der Kräfte überall senkrecht getroffen, sie ist also eine Niveaufläche, längs welcher keine Kraft herrscht, also Transport ohne Arbeit stattfinden kann. Sobald die Rotation und damit die Influenz der Fliehkraft wieder aufhört, neutralisiren sich der positive und negative Wasserstand wiederum zum Stande Null.

Fig. 112.

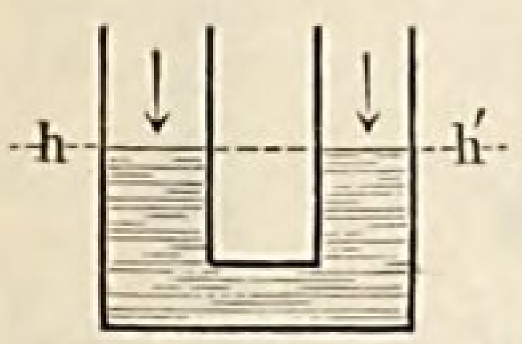
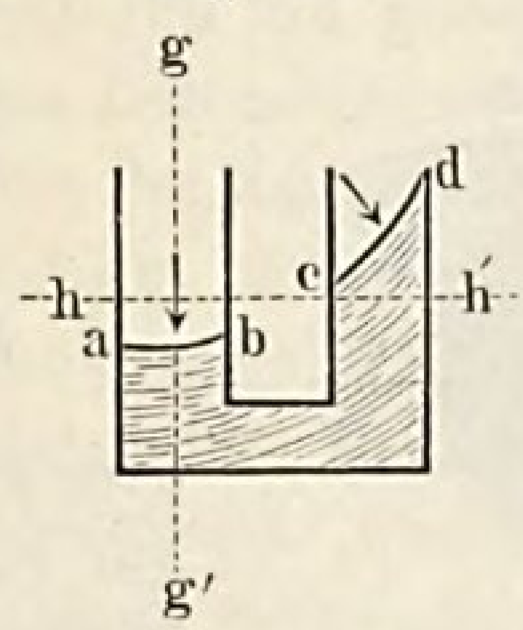


Fig. 113.



Wir wollen nun im nächsten Paragraphen eine elektrische Erscheinung besprechen, welche mit dem eben beschriebenen Experimente vollständig analog ist.

Die elektrische Influenz oder Vertheilung. Um die einschlägigen Versuche zu zeigen, bedienen wir uns am bequemsten des Influenzapparates von Riess, welcher in Fig. 114 (a. f. S.) in $^1/_5$ Grösse 53

abgebildet ist. Ein cylindrischer Messingstab *ab* ist mittelst eines wohl isolirenden Glasarmes vertical stehend an einem passenden Stativ so angebracht, dass er auf- und niedergeschoben und in beliebiger Höhe festgestellt werden kann. In gleicher Weise trägt das Stativ die Glasscheibe *d* und die hohle Messingkugel *K*, welche so gestellt werden, dass ihre Mittelpunkte vertical unter der verticalen Axe des Stabes *ab* stehen, dass der Abstand der Kugel von dem Stabe ungefähr 3 cm beträgt und die Glasscheibe frei zwischen ihnen steht.

An dem oberen und unteren Ende des Metallstabes *ab* sind an ungefähr 3 cm langen Leinenfäden hängend zwei Hollundermarkkügelchen mittelst je eines Kautschukringes angebracht. Ein drittes Kügelchen kann

Fig. 114.

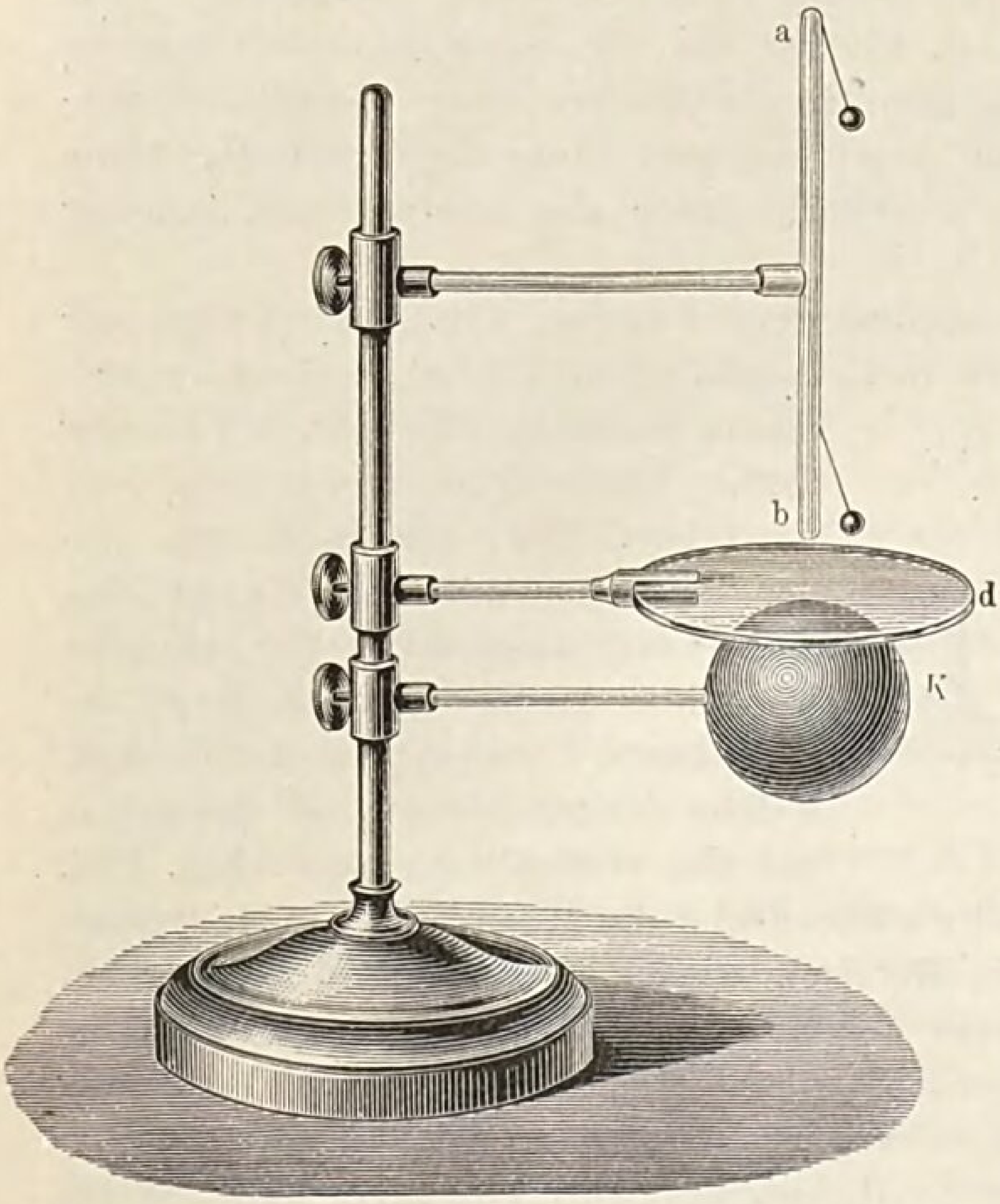


Fig. 115.

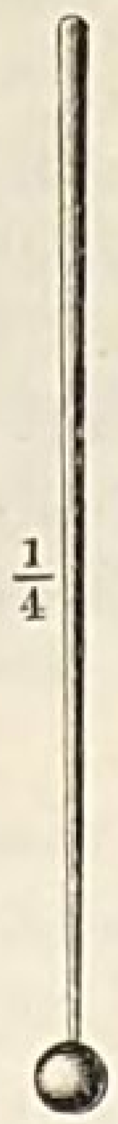
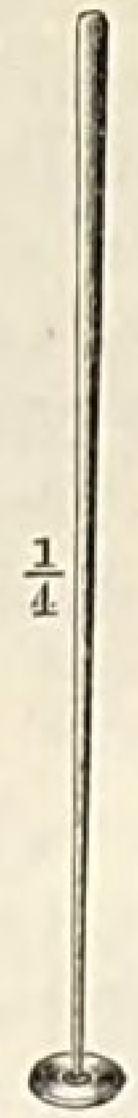


Fig. 116.



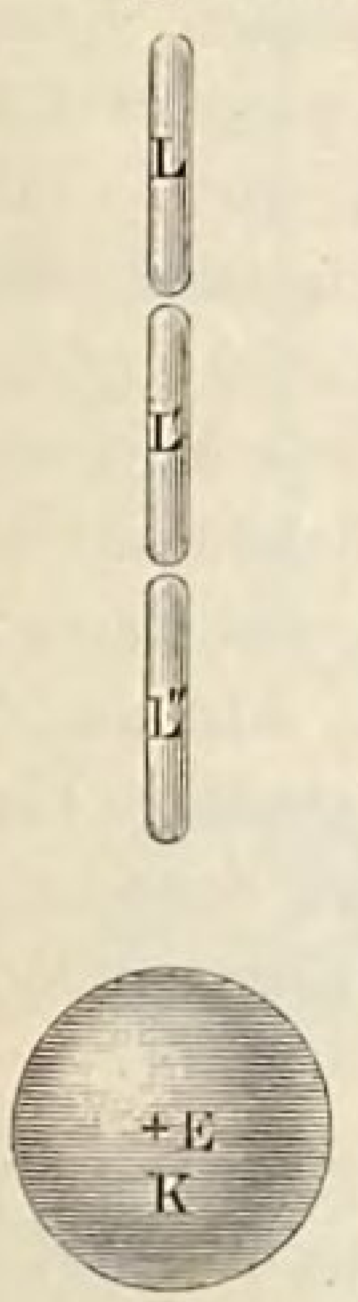
eventuell in der Mitte des senkrechten Leiters befestigt und nach der Höhe verschoben werden. Zu den weiteren Versuchen benöthigen wir sogenannte Probekügelchen, Fig. 115, oder auch Probescheibchen, Fig. 116. Die ersteren sind kleine metallische oder sonst gut leitende Kügelchen von $^1/_2$ bis 1 cm Durchmesser, welche an einem dünnen, etwa 20 cm langen Stäbchen aus Schellack oder Hartgummi (Federhalter) befestigt sind. Die Probescheibchen sind ebenso befestigte kreisförmige Scheibchen aus Rauschgold oder dünnem Messingblech von 1 bis $1^1/_2$ cm Durchmesser. Endlich verwenden wir noch einen metallenen Leiter mit isolirendem Glasarm und Griff zum Halten in freier Hand wie *ab*, Fig. 114, ohne Kugelpendel, bei welchem überdies durch aufgesteckte Hülsen die Gesammtlänge von *a* bis *b* so geändert werden kann, dass dieselbe kleiner, gleich oder grösser wird als die Länge des Leiters *ab*.

Als Elektroskop kann ein solches nach Fig. 108 oder eines der weiter unten zu beschreibenden feineren Instrumente benutzt werden; dasselbe muss hinlänglich entfernt aufgestellt sein.

Erster Versuch. Wir laden die Kugel K durch directe Mittheilung mit positiver Elektricität. Sofort wird das obere und noch mehr das untere Pendel abgestossen, während das mittlere wenig oder gar nicht ausschlägt. Die Stange ab ist also durch Influenz der elektrischen Kugel K ebenfalls elektrisch geworden. Nähert man eine geriebene Siegellackstange, so wird die untere Pendelkugel von ihr abgestossen, die obere stark angezogen. Ein geriebenes Glasstäbchen stösst umgekehrt die obere Kugel ab und zieht die untere an. Es ist also der Leiter ab oben positiv, unten negativ elektrisch geworden. Etwas unter der Mitte zeigt er sich neutral.

Erklärung. Wir denken uns den Leiter ab ursprünglich in mehrere von einander isolirte Leiter L, L', L'' zerlegt, Fig. 117. Sobald die Kugel positiv geladen wurde, erhielt dieselbe ein positives Potential, denn würde man sie mit der Erde in leitende Verbindung setzen, so würde positive Elektricität auf letztere, Arbeit leistend, abströmen. Aber auch sämmtliche Leiter in der Nähe der Kugel erhalten dadurch ein positives Potential, denn da auf allen diesen Leitern eine dort vorhandene positive Elektricität von der Kugel abgestossen wird, so würde sie von allen auf die Erde abströmen, sobald sie damit in Verbindung gesetzt würde. Da aber andererseits von der geladenen Kugel K auf die Leiter L, L', L'' positive Elektricität übergehen würde, wenn sie unter einander leitend verbunden würden, so folgt, dass das Potential auf diesen Leitern niedriger ist als auf der Kugel. Ferner ist leicht einzusehen, dass das Potential auf dem nächst gelegenen Leiter L'' höher sein muss als auf L' und auf diesem höher als auf L. Denn um von L' eine positive Elektricitätseinheit auf die Kugel K zu schaffen, haben wir zuerst die Arbeit zu leisten, um sie der Abstossung entgegen von L' auf L'' zu bringen und dann noch die Arbeit, um sie von L'' auf K zu bringen. Die Potentialdifferenzen sind den Arbeiten proportional, folglich ist die Potentialdifferenz zwischen L' und K grösser als zwischen L'' und K. Noch grösser muss sie zwischen L und K sein, da hier noch die dritte Arbeitsleistung für den Transport der $+ 1$ von L auf L' dazu kommt. Es folgen sich also die Potentiale der Höhe nach wie folgt: das höchste hat die Kugel K, dann der Leiter L'', dann L', dann L, dann die Erde mit dem Potential Null.

Fig. 117.



Nun denken wir uns, dass man die drei Leiter L, L', L'' unter einander leitend verbinde. Eine ungleiche Höhe des Potentials kann auf

ihnen nicht mehr fortbestehen, es muss Elektricität von dem höheren Potential in L'' auf L' und L überströmen. Hierdurch muss auf L'' ein Mangel, auf L ein Ueberschuss von Elektricität eintreten, während L' ein mittleres Verhalten zeigen wird. Das heisst mit anderen Worten: Durch die Influenz der positiv elektrischen Kugel wird der Leiter *a b* am zugekehrten Ende negativ, am abgewendeten Ende positiv elektrisch, was eben der Versuch gezeigt hat. Die durch Influenz erregte entgegengesetzte Elektricität wird Influenzelektricität erster Art, die gleichnamige solche zweiter Art genannt.

Zweiter Versuch. Wir laden wiederum die Kugel K positiv und stellen sie dem ungeladenen Leiter *ab* gegenüber wie beim ersten Versuche, prüfen aber diesmal die Elektricitäten mittelst Probekügelchen, welche wir, Fig. 118, nach einander bei *a*, dann bei *b*, dann in der Mitte anlegen und dann mit dem Knopfe eines Elektroskops in Berührung bringen. Es zeigt sich in Uebereinstimmung mit dem vorigen Versuche, dass das Probekügelchen bei *a* positive, bei *b* negative Ladung aufgenommen hat.

Erklärung. Wollte man dieselbe in der Weise aussprechen, dass das Probekügelchen eben nur die Elektricitätsart aufnehmen könne, welche an der berührten Stelle vorhanden ist, so wäre dies ganz verfehlt, wie dies aus den späteren Versuchen deutlich hervorgehen wird. Man muss bedenken, dass der Uebergang der Elektricität einzig und allein von der Potentialdifferenz abhängt. Da nun aber das Potential auf dem Leiter bei *a* und *b* gleich hoch ist, so kann das verschiedene Verhalten an diesen Stellen nur davon herrühren, dass das Probekügelchen in Folge der Influenz von K ebenfalls ein positives Potential erhält, welches aber in der Nähe von *b* grösser, in der Nähe von *a* kleiner ist, als an den betreffenden Stellen des Leiters *ab*. Es muss daher bei *b* positive Elektricität von der Probekugel auf den Leiter, bei *a* umgekehrt vom Leiter auf die Probekugel übergehen. Sie muss demnach bei *b* negativ, bei *a* positiv elektrisch werden.

Dritter Versuch. Wir verfahren wie vorhin und berühren dann bei *b* mit dem kürzeren isolirten Leiter $a'b'$, Fig. 119; derselbe zeigt am Elektroskop negative, aber schwächere Ladung, als die Probekugel bei gleicher Ladung von K gezeigt hat.

Erklärung. Die Höhe des durch die Influenz auf dem Leiter $a'b'$ entwickelten Potentials hängt bei gleicher Lage und Entfernung des zugewendeten Endes von seiner Länge ab und zwar in der Weise, dass das Potential mit grösserer Länge abnimmt. Es folgt dies aus den Betrachtungen an der Fig. 117. Das Potential eines aus den Leitern L'', L', L zusammengesetzten Leiters ist als Mittelwerth der Potentiale der einzelnen Theile entstanden zu denken. Lässt man vor der Ausgleichung derselben den Theil L mit dem niedrigsten Potential fort, so muss der Mittelwerth grösser werden. Die Mengen der Influenzelektricitäten dagegen nehmen mit der Länge des Leiters $a'b'$

zu, denn je verschiedener an den Enden ursprünglich das Potential war, desto mehr positive Elektricität muss von unten nach oben abfliessen, um gleiches Potential herzustellen. Daraus folgt also, dass der kürzere Leiter *a′b′* in seiner Lage, Fig. 119, durch die Influenz ein positives Potential erhält, welches kleiner als das der Probekugel, aber grösser als das des Leiters *ab* ist. Er muss daher an den letzteren positive Elektricität abgeben und dadurch negativ elektrisch werden, aber weniger stark als früher die Probekugel.

Vierter Versuch. Wir verfahren wie vorhin, jedoch mit einem Leiter *a′b′* von gleichen Dimensionen und in gleicher Lage wie *ab*, Fig. 120. Der Leiter *a′b′* zeigt nachher am Elektroskop keine Spur von Ladung.

Erklärung. Da beide Leiter unter genau gleichen Bedingungen stehen, so erhalten sie gleich hohes Potential, können einander daher

Fig. 118.

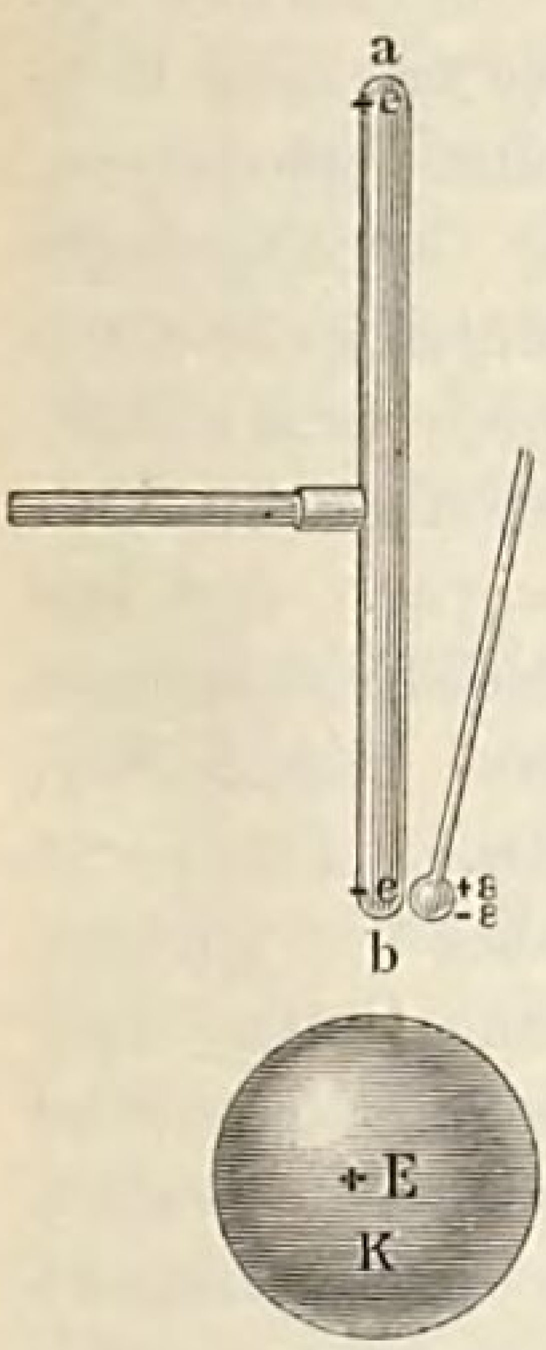


Fig. 119.

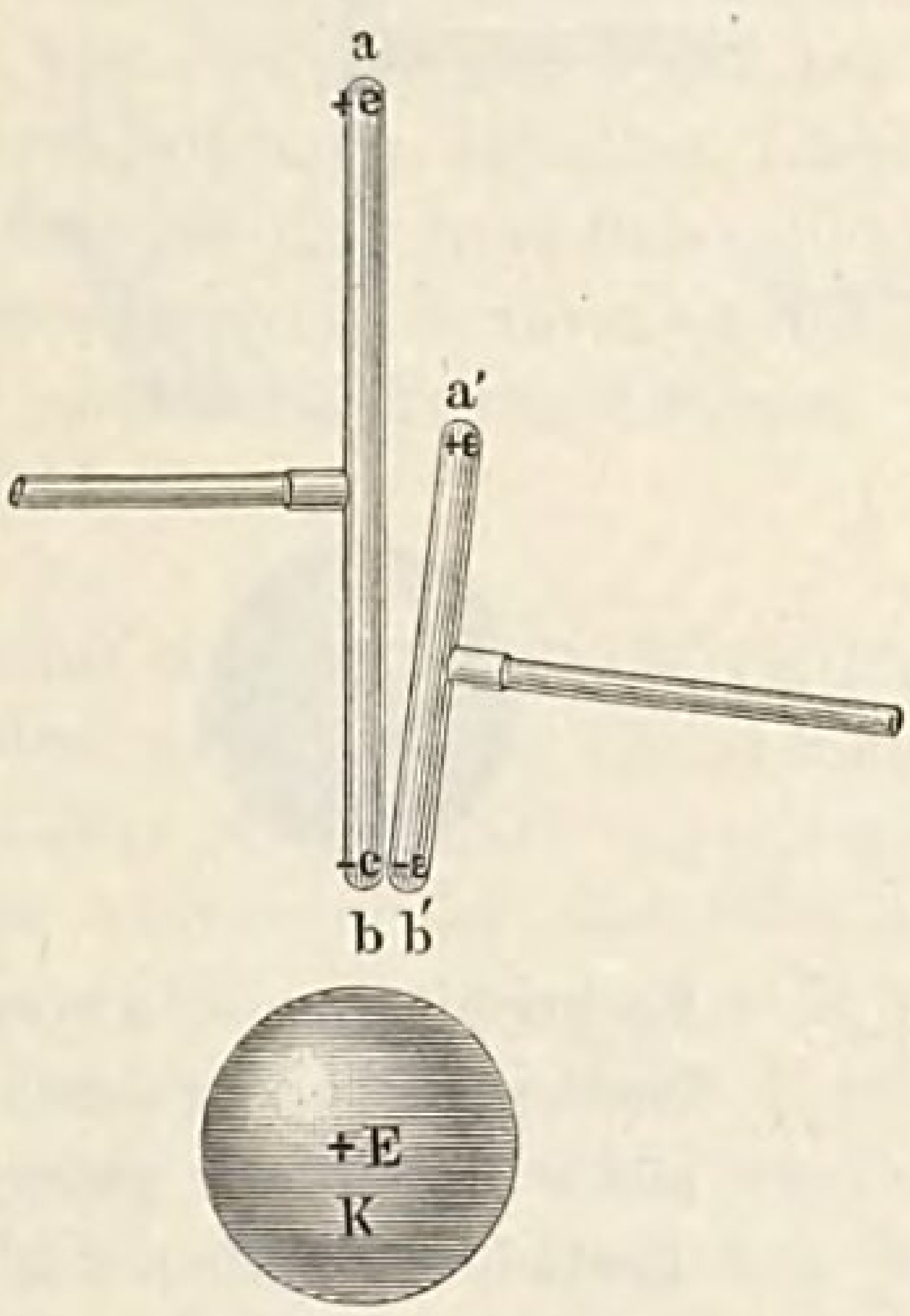
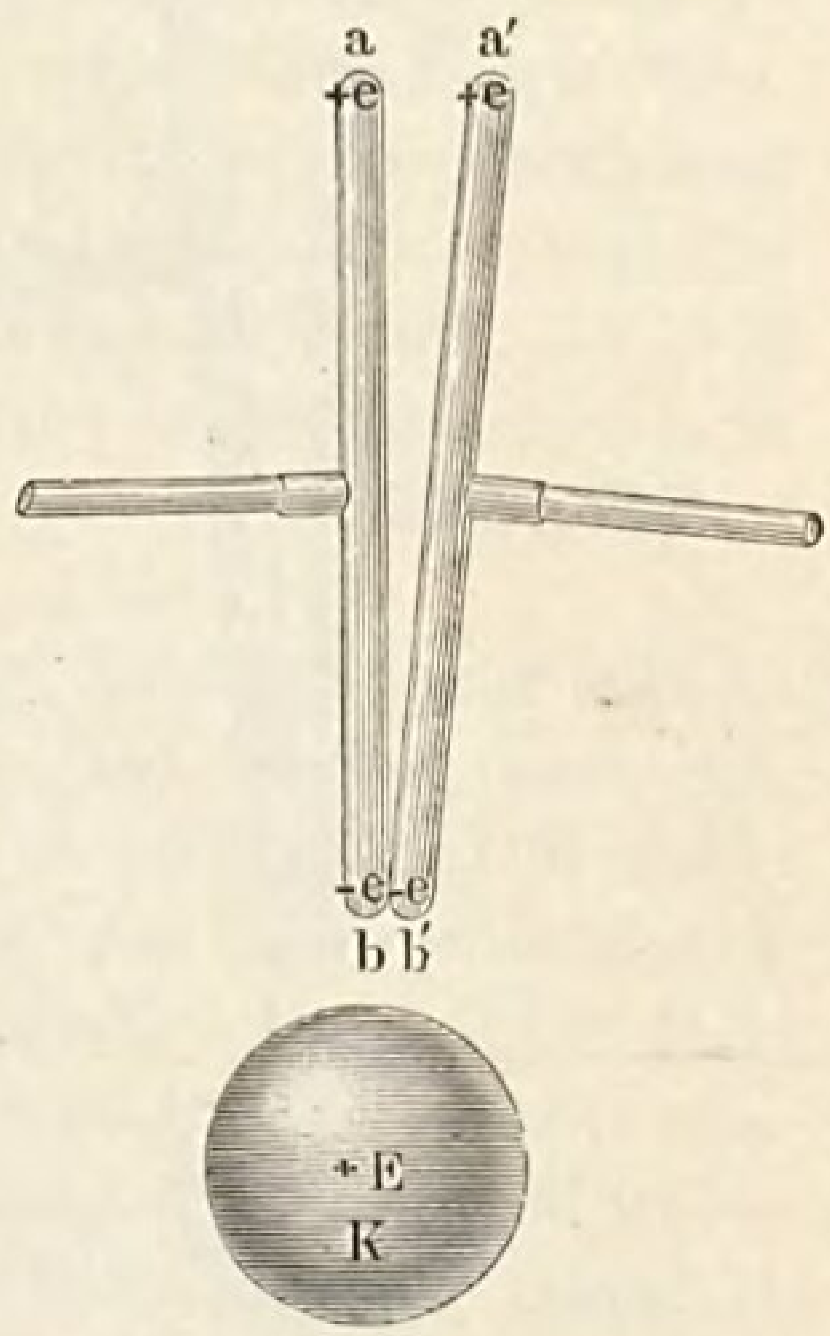


Fig. 120.



keine Elektricität mittheilen. Die geschiedenen Influenzelektricitäten vereinigen sich wieder, sobald man mit *a′b′* sich entfernt.

Fünfter Versuch. Wir verlängern den Leiter *a′b′* durch Ausziehen der aufgeschobenen Hülsen, Fig. 121 (a. f. S.). Nach der Berührung bei *b* erscheint derselbe am Elektroskop positiv elektrisch und zwar um so stärker, je mehr er verlängert worden ist.

Erklärung. Der längere Leiter *a′b′* muss nach den Erörterungen zum dritten Versuche durch die Influenz von *K* ein niedrigeres Potential erlangen als der Leiter *ab*. Bei der Berührung muss daher positive Elektricität von *ab* auf *a′b′* übergehen. Dieser Versuch zeigt recht auffallend, dass an der berührten Stelle des Leiters *ab* nicht immer diejenige Elektricität abgegeben wird, welche sich daselbst befindet.

Der Leiter *ab* ist bei *b* negativ elektrisch und dennoch strömt nicht von dieser negativen Elektricität auf den Leiter *a′b′* über, sobald der-

selbe (unter sonst gleichen Umständen) länger ist als *a b*, sondern nur, sobald er kürzer ist.

Sechster Versuch. Wir verfahren wie früher, berühren aber den Leiter *a b* bei *b* mit dem Finger oder irgend einem anderen zur Erde abgeleiteten Leiter, Fig. 122. Dadurch verliert derselbe seine positive Ladung und behält nur die negative zurück. Man erkennt dies am vergrösserten Ausschlag des unteren Pendels (nach Entfernung des Fingers), während das obere Pendel niederfällt, sowie daran, dass nach dem Entfernen der Kugel *K* der Leiter nunmehr negativ elektrisch ist und zwar stärker, als in den früheren Fällen.

Fig. 121.

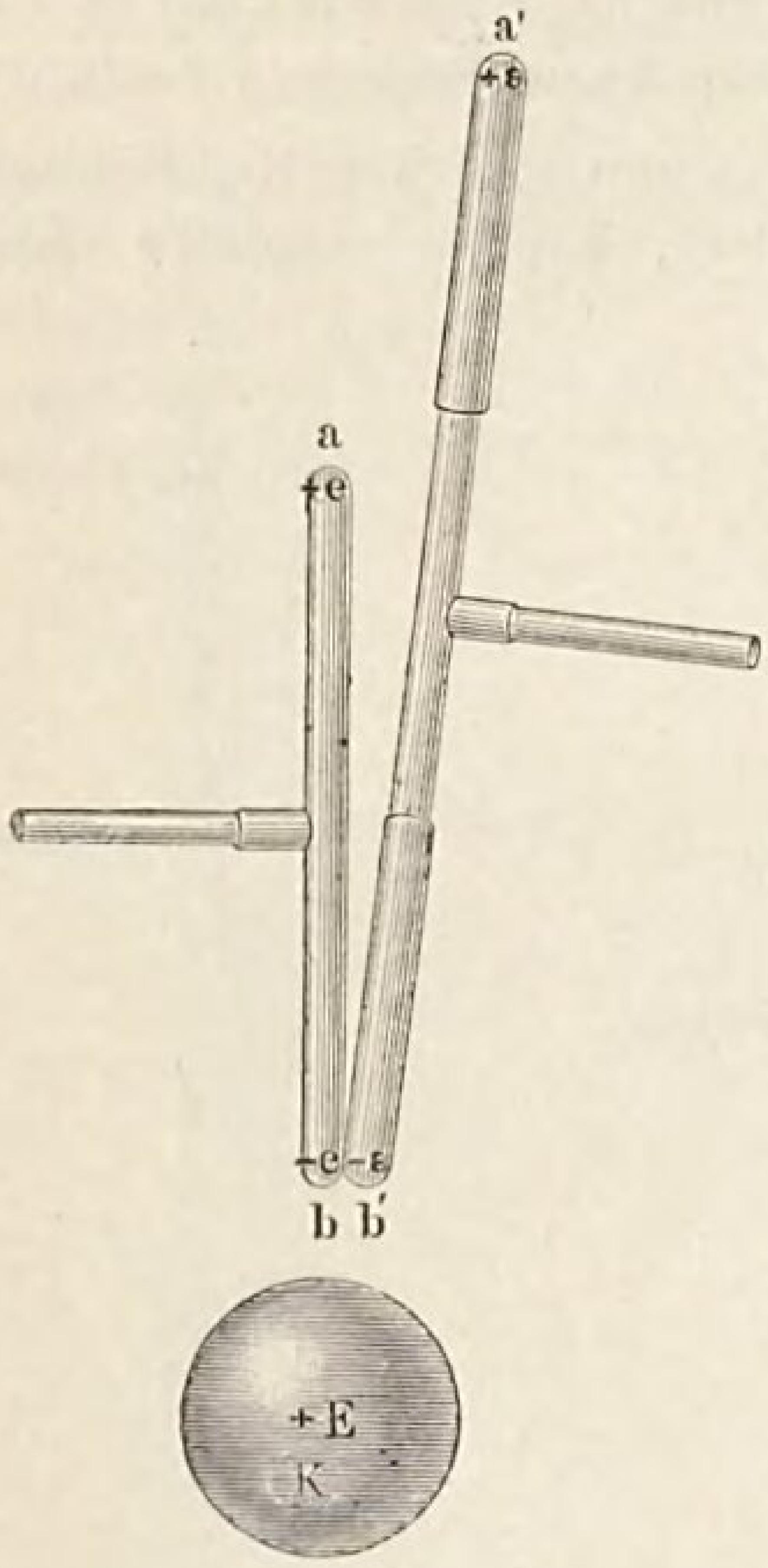
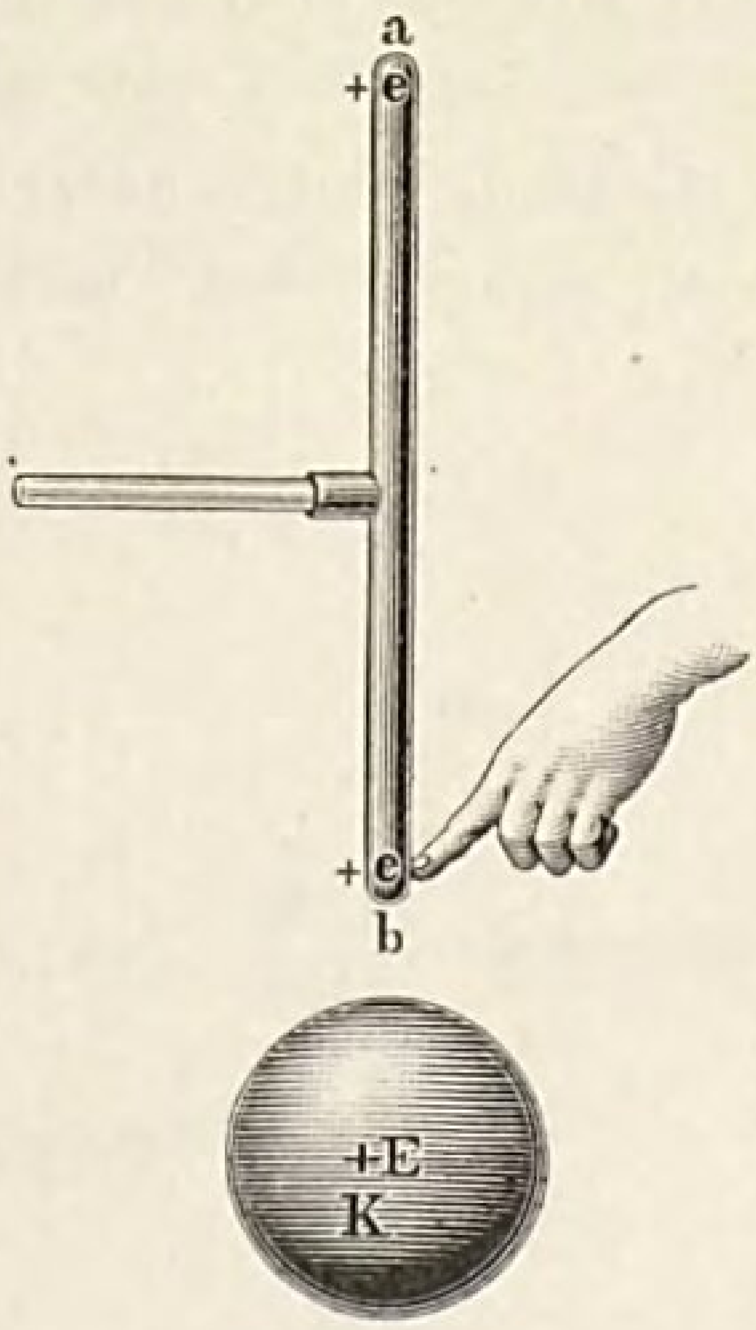


Fig. 122.



Erklärung. Der mit dem Erdboden verbundene, an *b* angelegte Finger stellt einen ausserordentlich verlängerten Leiter vor. Das Potential desselben muss gleich Null sein. Es muss daher positive Elektricität von *a b* auf den Finger und Erdboden übergehen, bis das Potential auf *a b* ebenfalls gleich Null geworden ist. Trotzdem bleiben Finger und Leiter *a b* negativ elektrisch. Nach Entfernung des ersteren fliesst dessen negative Ladung zur Erde. Entfernt man dann auch die Kugel *K*, so bleibt der Leiter *a b* negativ elektrisch und hat nun ein negatives Potential.

Siebenter Versuch. Man verfährt wie früher, berührt aber nach einander mit der Probekugel und den anderen immer grösseren Leitern zuletzt mit dem Finger am oberen Ende bei *a*. In allen diesen Fällen geht nur positive Elektricität auf den berührenden Leiter über, mag derselbe kleiner oder grösser sein, als der Leiter *a b*. Die übergehende Menge der positiven Elektricität ist desto grösser, je länger der berührende Leiter ist. Die nach Entfernung des berührenden Leiters und der Kugel *K* auf *a b* zurückbleibende negative Ladung ist daher am grössten, wenn mit dem Finger berührt wurde. Bei der Berührung mit letzterem ist der Erfolg genau derselbe, ob bei *a* oder *b* oder irgend

wo sonst die Berührung stattfand. Bei Berührung mit einem isolirten Leiter, der länger ist als *a b*, ist der Erfolg nur quantitativ verschieden, bei Berührung mit einem kürzeren Leiter (immer in der angenommenen Lage) ist der Erfolg bei verschiedenen Berührungsstellen auch qualitativ verschieden, da hierbei die übergegangene, sowie die rückbleibende Ladung nach Aufhebung der Influenz entgegengesetztes Zeichen besitzt, je nachdem die Berührung unten oder oben stattfand.

Die Erklärung dieser Thatsachen ist in dem Vorausgehenden enthalten.

Die früher übliche, den Potentialbegriff nicht benutzende Erklärung lautete folgendermaassen: Durch Näherung der positiven Elektricität auf der Kugel *K* werde der neutrale Zustand auf *a b* zersetzt, die negative Elektricität werde angezogen und am zugekehrten Ende gebunden, so dass sie nicht fortfliessen kann, wenn man auch mit dem Finger berührt. Die positive Elektricität werde an das abstehende Ende *a* getrieben und gehe daselbst, weil frei beweglich, auf den berührenden Finger über.

Das scheinbare Abströmen derselben Elektricität bei der Berührung in *b* ebenfalls allein durch ihre freie Beweglichkeit zu erklären, erscheint recht gezwungen, wogegen die Benutzung der Influenzwirkung auf den ableitenden Finger und der Potentialdifferenz eine vollständig befriedigende Erklärung zulässt.

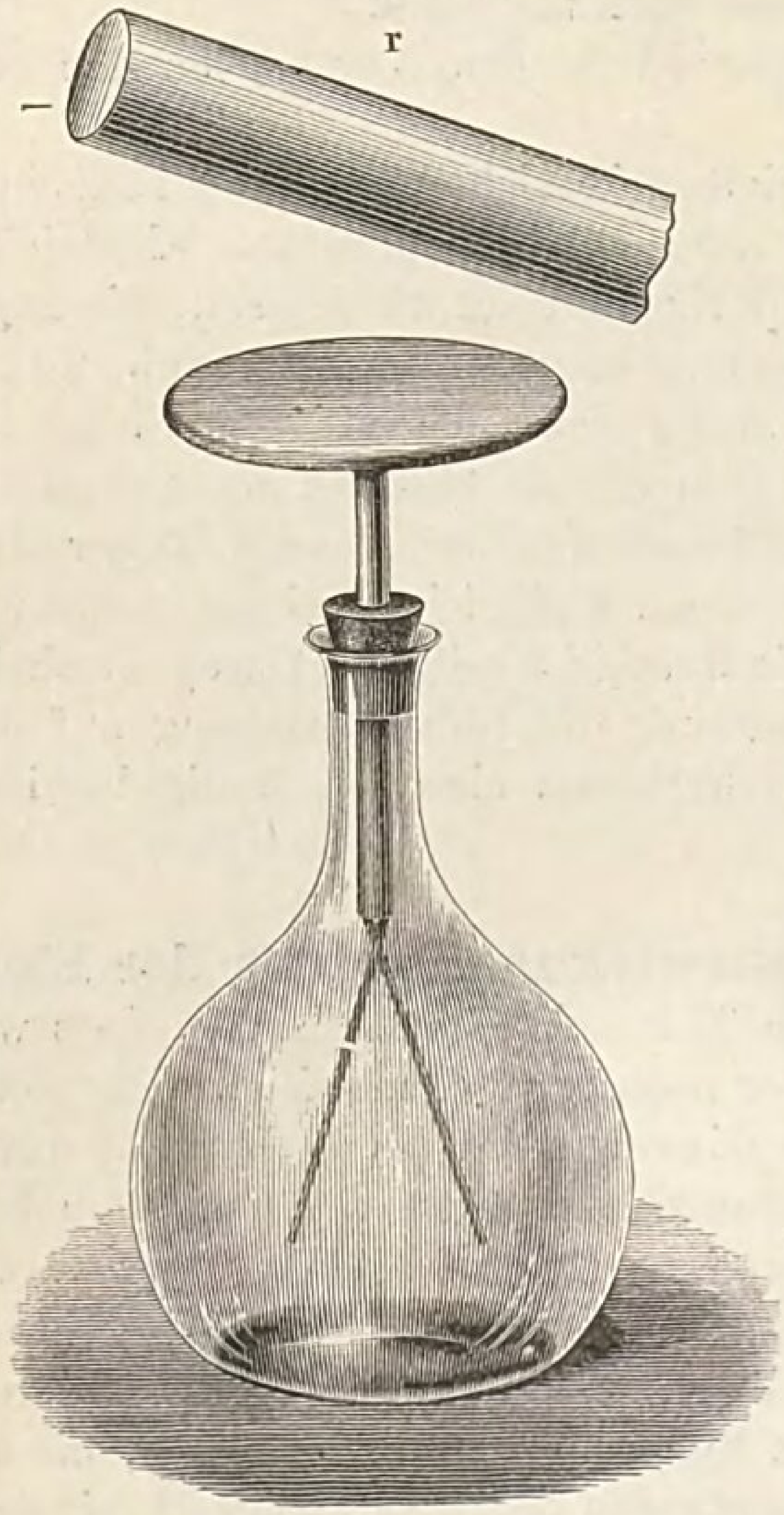
Anwendungen der Influenzwirkung, Ladung der Elektroskope. Aus den mitgetheilten Thatsachen geht hervor, dass wir, 54
um einen isolirten Leiter positiv oder negativ zu elektrisiren, nicht nothwendig einen Körper brauchen, der dieselbe Art der Elektricität durch Reibung angenommen hat. Wir können z. B. mittelst eines durch Reiben negativ elektrisirten Harzstabes einen Leiter ebenso gut positiv wie negativ elektrisch machen. Gleichnamig wird elektrisirt durch Mittheilung, ungleichnamig durch Vertheilung und Ableitung. Zu letzterem Behufe nähern wir den elektrischen Körper dem isolirten Leiter, bis die Influenzwirkung eintritt, berühren dann den letzteren ableitend mit dem Finger, entfernen dann zuerst den Finger und zuletzt den elektrischen Körper. Diese Art der Ladung ist insbesondere bei den Elektroskopen vorzuziehen, weil sie den Vortheil hat, dass sie sich in ihrer Stärke auf den gewünschten Grad viel sicherer abstufen lässt als bei der Elektrisirung durch directe Mittheilung bei der Berührung.

Nähert man z. B. einen negativ elektrisirten Hartgummistab einem Elektroskop, Fig. 123 (a. f. S.), so divergiren die Blättchen desto mehr, je näher der Stab gebracht wird. Ist der gewünschte Grad der Divergenz eingetreten, so berühren wir mit dem Finger, worauf die Blättchen ganz zusammenfallen. Entfernen wir den Finger und hierauf den Stab, so divergiren nun die Blättchen ebenso weit in Folge einer positiven Ladung.

So vorbereitet ist das Elektroskop für Beobachtungen am meisten geeignet.

Nähert man nämlich jetzt einen positiv elektrischen Körper, so vermehrt sich die Divergenz, nähert man einen negativ elektrischen Körper, so vermindert sich zuerst die Divergenz, wird dann, falls der genäherte Körper genügend stark elektrisch ist, gleich Null und geht dann bei weiter fortgesetzter Annäherung in eine Divergenz mit negativer Ladung über.

Fig. 123.



Beim Entfernen verschwindet zuerst diese Divergenz und geht durch Null in die ursprüngliche Divergenz mit positiver Ladung zurück. Man hat deshalb bei der Prüfung einer elektrischen Ladung vorsichtig vorzugehen, nicht sofort den zu prüfenden Körper in grosse Nähe zu bringen, da man sonst das Verschwinden der ersten Divergenz übersehen und beim Anblick des Zunehmens der zweiten Divergenz über die Art der geprüften Elektricität einen irrthümlichen Schluss ziehen könnte.

Eine weitere Quelle des Irrthums kann durch Influenzvorgänge in der Umhüllung des Elektroskops oder in der Unterlage desselben oder in dauernden Ladungen dieser Theile hervorgebracht werden. Das Glas ist nämlich manchmal etwas leitend, oder wird auch durch Reibung beim Abwischen oder durch die Berührung mit den geladenen Blättchen elektrisch. Um alle diese Fehlerquellen zu vermeiden, ist am sichersten, diese Umgebung der Blättchen gut leitend zu machen und durch Verbindung mit der Erde dauernd auf dem Potential Null zu erhalten. Diesem Zwecke entsprechen die im §. 49 erwähnten, in Fig. 108 sichtbaren Stanniolstreifen, sowie das cylindrische Metallgehäuse des v. Beetz'schen Projectionselektroskops, Fig. 109.

Durch die Beachtung der Influenzvorgänge ist es möglich, manche auf den ersten Blick befremdende Erscheinung aufzuklären. Bei Anstellung des Fundamentalversuches (Fig. 102, S. 123), z. B. kann man beobachten, dass die Kügelchen viel kräftiger angezogen werden, wenn sie auf gut leitender Unterlage, z. B. einer Metallplatte, ruhen, während sie auf einer Unterlage von Glas oder polirtem Holz weniger heftig empor-

geschnellt werden. Im ersten Falle kann nämlich die Influenzelektricität der zweiten Art, welche der Anziehung entgegenwirkt, abströmen, im zweiten Falle nicht.

Aus demselben Grunde wird eine isolirt aufgehängte Kugel von einem angenäherten elektrischen Stabe in dem Augenblicke viel heftiger als vorher angezogen, in welchem man die Kugel mit dem Finger ableitend berührt. Auch ist die Anziehung stets stärker, wenn die Kugel nur unvollkommen oder gar nicht isolirt aufgehängt ist, als wenn sie gut isolirt ist.

Eine andere leicht zu beobachtende Erscheinung, welche in analoger Weise auch bei den Magneten wahrgenommen werden kann, ist folgende: Nähert man einen elektrischen Stab einer gleichnamig elektrisirten aufgehängten Kugel, so wird selbe abgestossen und weicht dem nachfolgenden Stabe aus. Nähert man den letzteren aber gewaltsam noch mehr, so erfolgt endlich neuerdings eine Anziehung, der dann noch stärkere Abstossung folgt. Die Erklärung ist nicht schwierig. Der Stab habe die Elektricität $+ E$, die Kugel die Elektricität $+ e$. Bei der Annäherung werden Influenzelektricitäten $+ \varepsilon$ und $- \varepsilon$ entwickelt. In Folge dessen wirkt $+ E$ abstossend auf $e + \varepsilon$, anziehend auf $- \varepsilon$. So lange aber die Annäherung nicht über eine gewisse Grenze geht, überwiegt noch immer die Abstossung auf die grössere, wenn auch entferntere Menge $+ e + \varepsilon$ über die Anziehung auf die geringere, aber nähere Menge $- \varepsilon$. Verringert man die Entfernung, so wächst die Abstossung in geringerem Verhältnisse als die Anziehung. Es kommt daher nothwendig ein Moment, wo sich die grössere Nähe der $- \varepsilon$ überwiegend geltend macht. Die Anziehung erfolgt also auch hier nicht zwischen gleichnamig elektrischen Körpern, sondern zwischen dem positiv elektrischen Stabe und der zugewendeten, durch Influenz negativ elektrisirten Seite der Kugel, deren Ladung allerdings im Ganzen überwiegend positiv ist.

Diese Betrachtungen verschaffen uns die Ueberzeugung, dass überhaupt alle elektrische Anziehung, nämlich auch die zwischen elektrischen und nicht elektrisirten Körpern, auf vorausgegangener Influenz und somit auf Anziehung in Folge entgegengesetzt elektrischer Zustände beruht. Ebenso stellt sich jede sogenannte „Elektrisirung durch Mittheilung“ dar als eine Elektrisirung durch Vertheilung mit darauf folgender Neutralisirung der Influenzelektricität erster Art.

Diese Neutralisirung kann durch gegenseitige Berührung oder durch die Wirkung der Spitzen erfolgen, auf welche wir weiter unten zu sprechen kommen.

Das Verhalten dielektrischer Körper. Im §. 48 haben 55
wir die Körper in Leiter und Nichtleiter eingetheilt. Genauer sollte man unter ihnen gute und schlechte Leiter unterscheiden, da auch die schlechtesten Leiter, welche wir Isolatoren oder aus einem später zu

erörternden Grunde dielektrische Körper*) nennen, die Elektricität, wenn auch sehr langsam, fortzuleiten vermögen. Aus diesem Grunde sind wir auch nie im Stande, einen elektrisirten Leiter so zu isoliren, dass er keine Elektricität verliert.

Der Verlust durch die isolirenden Träger findet theils durch ihre Substanz, theils durch eine dünne Feuchtigkeitsschicht statt, mit welcher sie sich überziehen. Dieses letztere findet besonders bei Glas und Seide statt, auf welche sich Wasserdampf sehr leicht niederschlägt. Es ist deshalb immer nöthig, Glasoberflächen, die gut isoliren sollen, mit einer Schicht von Schellackfirniss zu überziehen. Nach Coulomb's Versuchen isolirt ein so überzogener Glasstab schwache Ladungen ebenso wie eine Schellackstange, wenn er 50 bis 60 cm lang ist. Man muss freilich durch Erwärmen dafür sorgen, dass alle Feuchtigkeit vollkommen entfernt sei. Da solche Träger nur dann nahezu vollständig isoliren, wenn sie eine hinreichende Länge haben, so ist klar, dass sie selbst eine gewisse elektrische Ladung annehmen, und man begreift wohl, dass eine stärkere Ladung, die gleichartige Elektricität mit grosser Kraft abstossend, sie bis an das Ende des isolirenden Trägers treibt und sie nöthigt, langsam und continuirlich in den Boden überzuströmen. Dass ein Leiter durch seine Träger nahezu vollständig isolirt sei, erkennt man daran, dass er, mit mehreren derselben in Berührung gebracht, nicht mehr verliert, als wenn er von einem einzigen getragen wird. Aller Verlust, welchen er sodann erleidet, rührt nur von der Berührung mit der Luft her.

Der Verlust durch die Luft rührt theils von dem in der Luft enthaltenen Staube, theils vom Wasserdampf her, denn er nimmt mit der Feuchtigkeit der Luft zu. Es ist dies so auffallend, dass, wenn man über eine elektrische Glasröhre oder einen Harzstab hinbläst, diese alle Elektricität verlieren. Ebenso verhält es sich, wenn man nach einem isolirten Leiter bläst, nur darf man natürlich diesem nicht zu nahe kommen, weil sonst ein Funken überspringt.

Die Verluste, welche in ganz trockener Luft oder in trockenem Dampfe auftreten, werden theils den Staubtheilchen, theils freien Ionen (elektrisch geladenen Bestandtheilchen zerfallener Molekeln) zugeschrieben.

Auch der Elektrisirung durch Influenz sind die dielektrischen Körper fähig. So z. B. kann man zeigen, dass eine Siegellackstange, die man in unelektrischem Zustande dem unteren Ende des Leiters *a b*, Fig. 114, nähert, das dortige Hollundermarkkügelchen abstösst, also durch Influenz der Kugel am unteren Ende Influenzelektricität erster Art angenommen hat. Damit ist bewiesen, dass in der Harzmasse eine Scheidung, also auch eine Bewegung der Elektricitäten stattfindet. Während jedoch in den guten Leitern die Influenz und die dadurch hervorgeru-

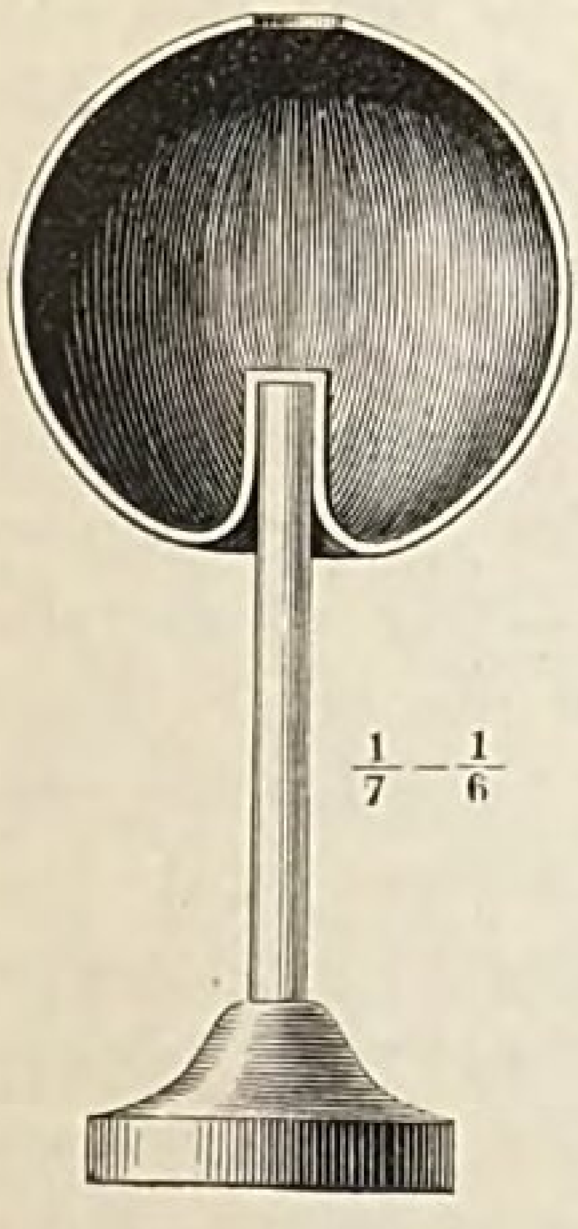
*) Neuerdings werden die Isolatoren und die dielektrischen Körper wiederum von einander unterschieden, da auch leitende Körper dielektrisches Verhalten zeigen können.

fene Bewegung der Elektricitäten momentan sich vollzieht, dauert es bei den dielektrischen Körpern längere Zeit, bis die neue Gleichgewichtsanordnung sich vollendet. Nach Entfernung des influenzirenden Körpers dauert es dann wiederum längere Zeit, bis sich die geschiedenen Elektricitäten vereinigen. Es ist anzunehmen, dass in den dielektrischen Körpern zunächst eine Art Polarisation eintritt, d. h. dass die einzelnen Theilchen derselben durch Influenz nach der einen Seite positiv, nach der anderen Seite negativ werden, etwa so wie eine Reihe von sich nahestehenden Eisenstäbchen durch magnetische Influenz nach der einen Richtung Nordpole, nach der anderen Südpole erhalten.

Dauert die Influenz auf den dielektrischen Körper nur kurze Zeit, so verschwindet nachher mit der Polarisation auch der elektrische Zustand bald. Hat aber die Influenz länger gedauert, so sind merkliche Mengen der Influenzelektricitäten nach entgegengesetzten Richtungen gewandert, welche nachher erst allmälig wieder zur Neutralisation gelangen. Da nun in dieser Richtung sich die dielektrischen Substanzen verschieden verhalten, so ist bei denselben die Influenzwirkung nicht allein von der Grösse, Gestalt und Lage, sondern auch von ihrer inneren Beschaffenheit abhängig, wodurch sie sich also von den guten Leitern wesentlich unterscheiden. Wir werden an späterer Stelle nochmals auf das Verhalten dieser Körper zu sprechen kommen.

Sitz der elektrischen Ladung. So lange die Elektricität durch einen Leiter strömt, bewegt sie sich durch seinen ganzen Querschnitt; sobald sie aber ins Gleichgewicht gelangt ist, sammelt sie sich ausschliesslich an der äusseren Oberfläche der Körper. 56

Fig. 124.



$\frac{1}{7}$—$\frac{1}{6}$

Es ist dies eine nothwendige Folge der gegenseitigen Abstossung der gleichnamigen Elektricitätsmengen, welche sich so anordnen, dass sie sich am weitesten von einander entfernen.

Man kann diesen Sachverhalt durch folgende Versuche erweisen.

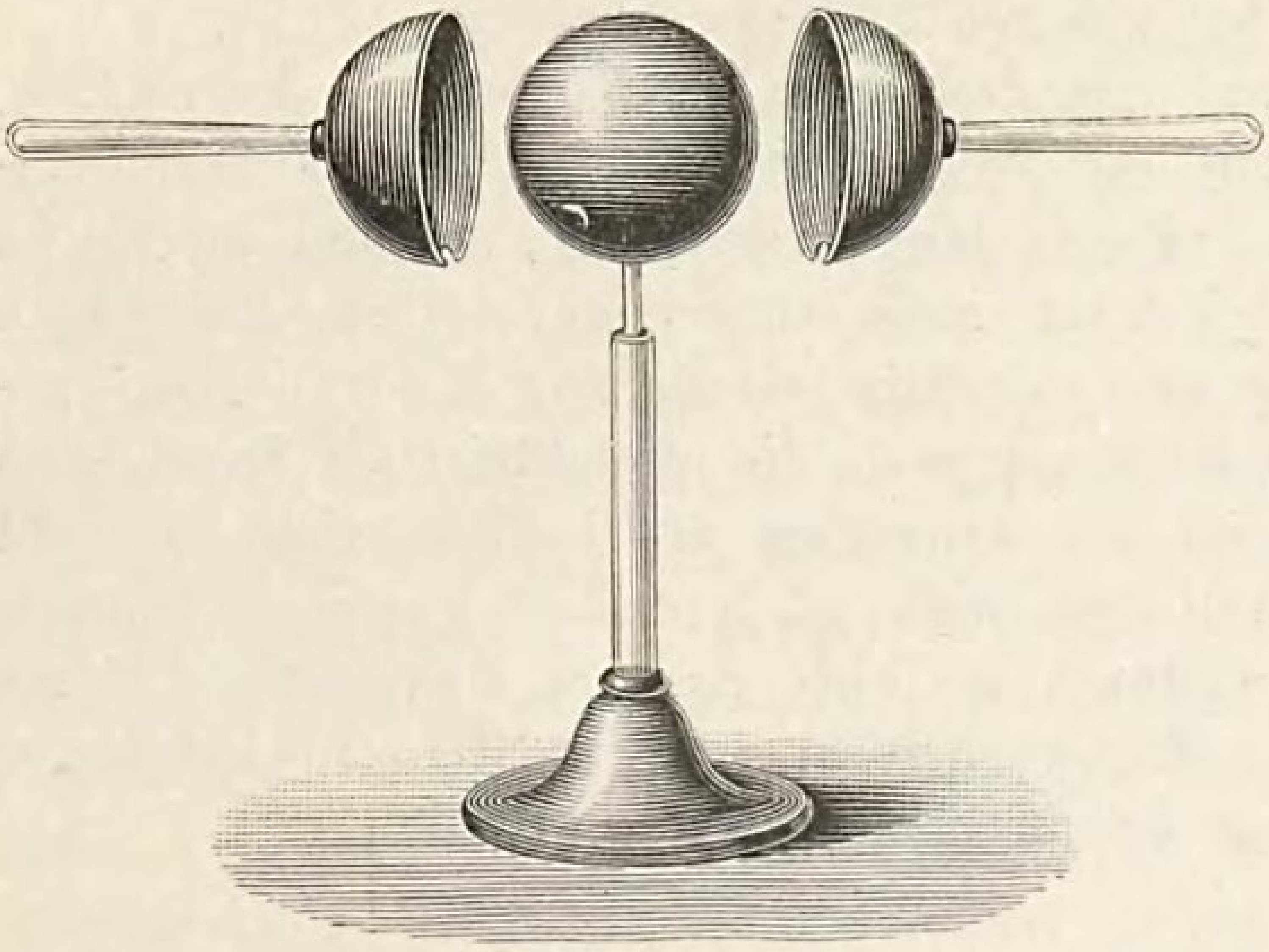
Erster Versuch (Coulomb). Eine isolirte Kugel von Messingblech, welche oben mit einer Oeffnung versehen ist, wie man Fig. 124 im Durchschnitt sieht, werde elektrisirt. Berührt man nun die äussere Fläche der Kugel an irgend einer Stelle mit dem Probescheibchen, so nimmt es eine elektrische Ladung an, wie man mit Hülfe eines Elektroskopes zeigen kann. Berührt man aber mit dem Probescheibchen, indem man es durch die Oeffnung der Hohlkugel in das Innere derselben einführt, eine beliebige Stelle der inneren Kugelfläche, so zeigt es sich nach dem Herausziehen aus der Kugel unelektrisch, vorausgesetzt, dass man bei dieser

Operation die Berührung des Probescheibchens mit den Rändern der Oeffnung vermieden hat.

Wenn dieser Versuch gelingen soll, muss das Stäbchen, an welchem das Probescheibchen befestigt ist, möglichst gut isolirt sein. Ausserdem ist es gut, wenn der Rand der Kugelöffnung mit einem Ringe von Schellack eingefasst ist.

Führt man ein mit Elektricität geladenes Probescheibchen ins Innere der Kugel ein, so giebt es daselbst seine Elektricität vollständig ab und ist nach dem Herausziehen unelektrisch. Die abgegebene Elektricität wandert an die Aussenseite der Kugel.

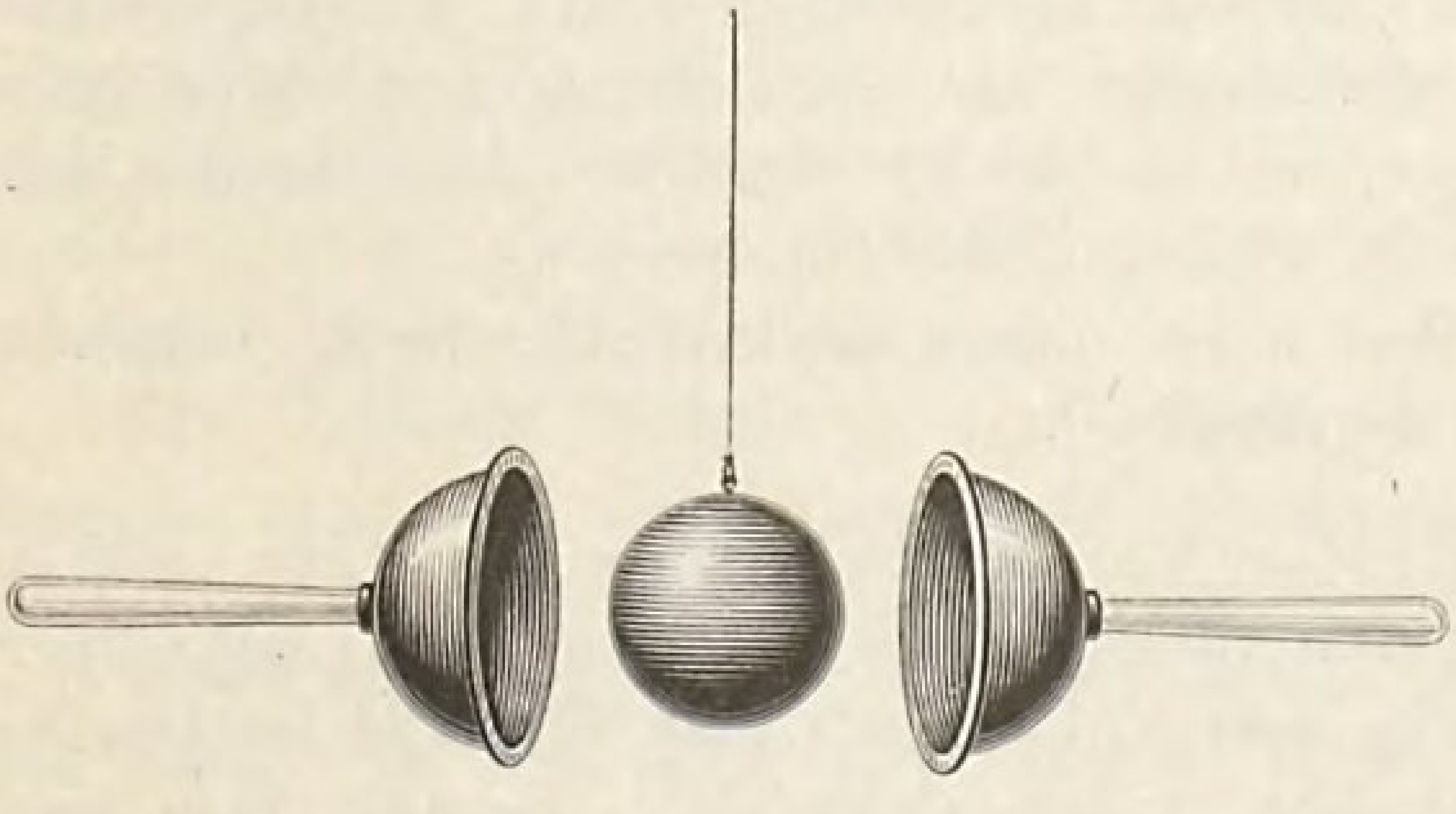
Fig. 125.



Berührt man dagegen mit einem nicht isolirten Stäbchen die Innenseite der Kugel, so wird dieselbe gerade so entladen, wie beim Berühren an der Aussenseite.

Zweiter Versuch (Coulomb). Eine leitende Kugel ist isolirt aufgestellt oder aufgehängt, Fig. 125 und 126; wird dieselbe von den beiden Halbkugeln, welche an isolirenden Griffen gehalten werden, umschlossen, dann elektrisirt, so zeigt sich nach dem gleichzeitigen Entfernen der letzteren die innere Kugel unelektrisch, die Halbkugeln dagegen haben die Elektricität aufgenommen. Der Erfolg ist derselbe, wenn die innere Kugel zuerst geladen und dann umschlossen wird.

Fig. 126.



Bei der Anordnung in Fig. 125 liegen die Halbkugeln nicht überall an, denn sie haben am Fuss entsprechende Ausschnitte, welche als eine Unvollkommenheit des Versuches anzusehen sind. Bei der Anordnung Fig. 126 lässt sich die innere Kugel vollständiger einschliessen, indem man den Aufhängefaden einklemmt. Durch Neigen bringt man die innere Kugel in leitende Berührung mit der Umhüllung und entfernt die Halbkugeln erst, nachdem diese Berührung wieder aufgehoben ist.

Man vermeidet dadurch die Gefahr, welche bei der anderen Anordnung nahe liegt, dass durch ungleichzeitiges Abheben der Halbkugeln eine nachherige, wenn auch geringe Ladung der inneren Kugel mitgetheilt wird.

Dritter Versuch. Setzt man ein empfindliches Elektroskop in eine dasselbe allseitig umschliessende leitende Umhüllung, welche letztere isolirt und elektrisirt ist, so zeigt das Elektroskop keine Spur von Elektricität und zwar auch dann nicht, wenn die Blättchen desselben mit der elektrischen Hülle leitend verbunden sind. Um diesen Versuch anzustellen, kann man das Elektroskop bis zum Hals in ein mit Wasser gefülltes isolirtes Glasgefäss tauchen und über die hervorragende Zuführung eine Bleikappe stürzen, die bis ins Wasser reicht und durch ihr Gewicht gleichzeitig den Auftrieb überwindet. Besser bedient man sich statt

Fig. 127.

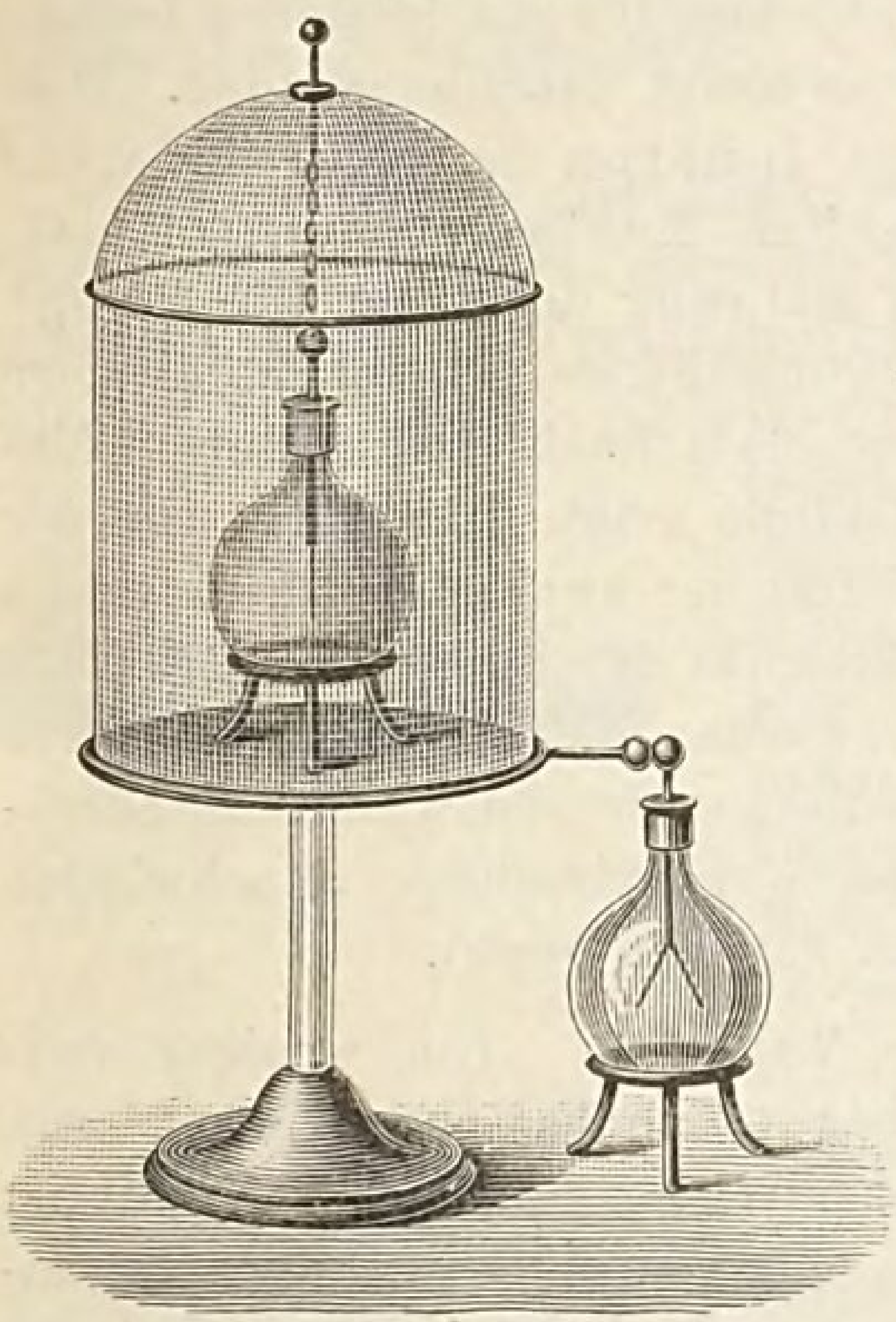


Fig. 128.

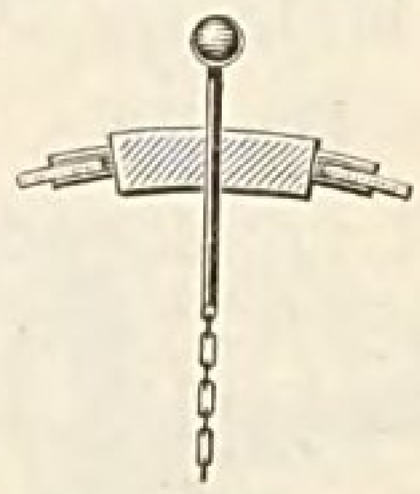
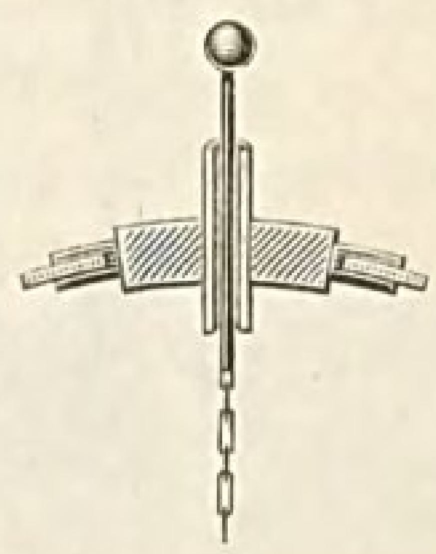


Fig. 129.



dessen des in Fig. 127 abgebildeten Apparates. Ein aus Metalldrahtgeflecht hergestellter Käfig, dessen Theile zerlegt und von dem isolirten Metallteller abgehoben werden können, hat am oberen Ende eine kreisförmig eingefasste Oeffnung, in welche entweder ein mit dem Käfig leitend verbundener Metallconus mit Draht, Kugel und Kettchen, wie Fig. 128 zeigt, eingesetzt wird oder in welche eine durch Hartgummi und Glasrohr isolirte Zuleitung, Fig. 129, eingeführt werden kann. In das Innere des Käfigs wird ein Goldblattelektroskop eingeschlossen, dessen Kugel durch das Kettchen mit dem oberen Knopf des Käfigs in Verbindung gesetzt werden kann, ein zweites Elektroskop ist von aussen mit dem Käfig leitend zu verbinden.

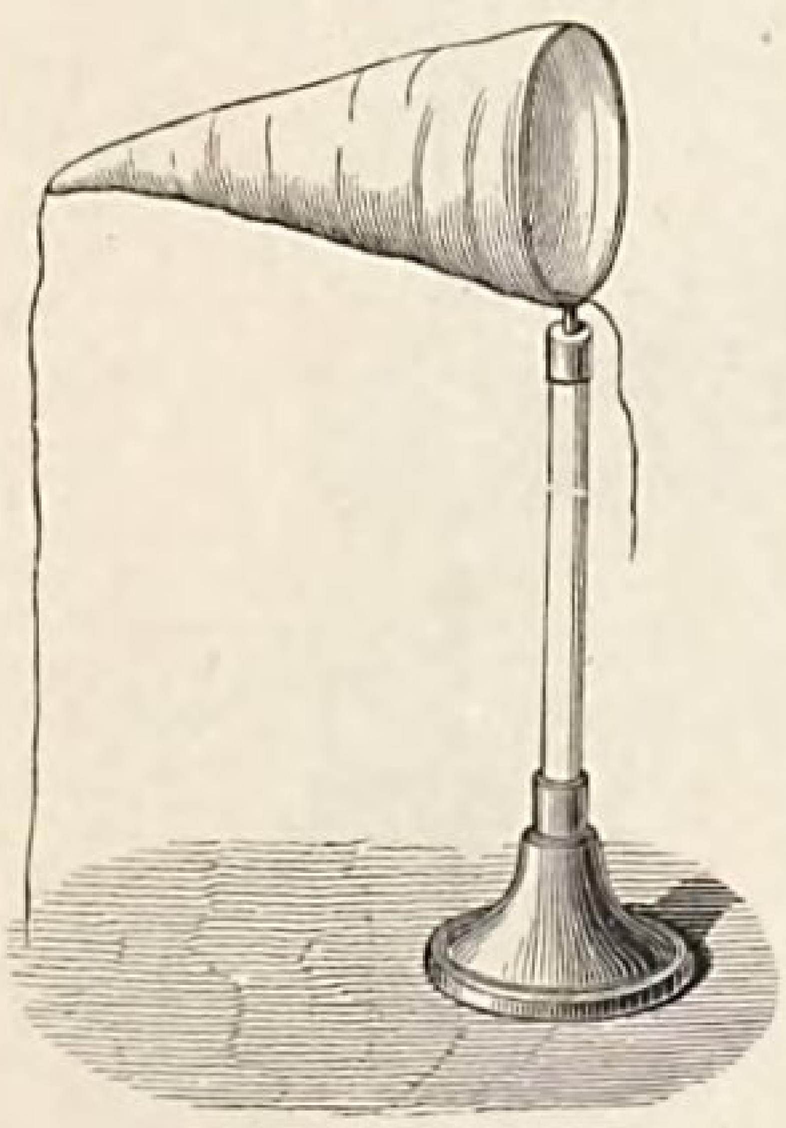
Mag nun die Kugel des inneren Elektroskops mit dem Käfig leitend verbunden sein oder nicht, so zeigt dasselbe keine Spur von Ladung,

wenn man letzteren elektrisirt, während das äussere Elektroskop starke Ausschläge giebt. Dies gilt aber nur bei vollständiger Umhüllung. Hebt man die Drahtnetzcalotte ab, oder setzt man die isolirte Zuführung (Fig. 129) ein, so dass die Kugel derselben als eine ausserhalb der elektrisirten Hülle befindliche Fortsetzung des Elektroskops erscheint, so tritt sofort eine Ladung auf.

Faraday hat diesen Versuch in grossem Maassstabe ausgeführt, indem er eine isolirte Kammer von solchen Dimensionen herstellte, dass er selbst mit einem feinen Elektroskope innerhalb derselben Platz nehmen konnte. Während die leitende Aussenseite der Kammer durch eine kräftige Elektrisirmaschine die stärksten Ladungen erhielt, zeigte sich im Inneren keine Spur derselben.

Vierter Versuch. Setzt man ein Elektroskop im geladenen Zustande ins Innere des isolirten Käfigs, ohne dasselbe mit letzterem leitend zu verbinden, so bleibt dasselbe geladen. Dies zeigt, dass im Inneren der Körper wohl ein elektrischer Zustand möglich ist, wenn man für Isolirung desselben Sorge trägt. Bei der Anstellung dieses Experimentes wird man bemerken, dass auch das äussere Elektroskop eine Ladung zeigt. Dies rührt von der Influenzelektricität der zweiten Art her, welche durch die Elektricität des inneren Elektroskops hervorgerufen wurde. Durch Ableitung zur Erde lässt sich diese entfernen, worauf die Divergenz des äusseren Elektroskops verschwindet, die des inneren dagegen steigt.

Fig. 130.



Fünfter Versuch. Ein weniger vollkommenes aber einfaches Experiment von Faraday ist das folgende: Auf einen isolirenden Glasfuss, Fig. 130, ist ein Metallring aufgesteckt, an welchem ein conischer Sack von Baumwollengaze, ähnlich einem Schmetterlingsnetz, befestigt ist. Mittelst eines seidenen Fadens, welcher in der Spitze des Kegels festgenäht ist, kann man den Beutel umwenden. Wenn man dem Apparat eine elektrische Ladung mitgetheilt hat, so findet man mit dem Probescheibchen, dass nur die äussere Fläche merklich elektrisch ist. Wendet man nun den Beutel mittelst der Seidenschnur um, so dass die bisher innere Fläche die äussere wird, so findet man, dass die beiden Oberflächen mit ihrer Lage auch ihre Ladung vertauscht haben, dass sich abermals die elektrische Ladung nur auf der äusseren Oberfläche befindet.

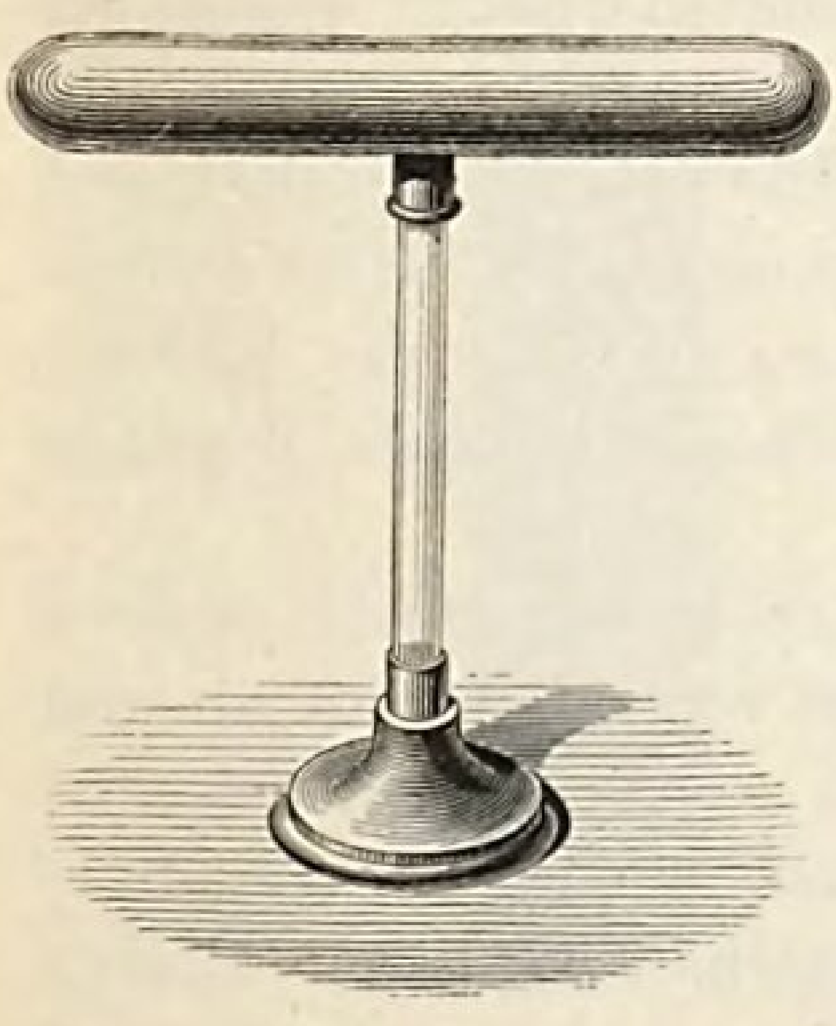
Sechster Versuch. Nimmt man je zwei gleich grosse isolirte Kugeln mit leitender Oberfläche, von denen eine im Inneren hohl, die andere mit irgend einem Materiale, z. B. Metall, Holz, Hollundermark, Flüssigkeiten etc. gefüllt ist, elektrisirt die beiden Kugeln, während sie

sich berühren und bestimmt dann an den getrennten Kugeln die Grösse ihrer Ladungen, so findet man dieselben immer gleich gross. Daraus folgt, dass das Fassungsvermögen oder die Capacität der Körper für die Elektricität von dem Materiale in ihrem Inneren unabhängig und ebenso gross ist, wie bei hohlen Körpern gleicher Grösse und Gestalt, woraus dann weiter gefolgert werden kann, dass dieses Innere überhaupt keine Elektricität aufnimmt. Auf den Begriff der elektrischen Capacität werden wir weiter unten zurückkommen.

Dass im Inneren aller wie immer geformter, ringsum geschlossener Leiter die auf deren Oberfläche befindliche Elektricität keine Wirkung äussern könne, folgt, wie sich mittelst der höheren Mathematik zeigen lässt, nothwendig als Consequenz des Coulomb'schen Gesetzes, nach welchem die elektrische Fernwirkung mit dem Quadrat der Distanz abnimmt. Umgekehrt folgt dieses Gesetz aus den oben mitgetheilten Thatsachen (§. 64 und 67).

Anordnung der Elektricität auf der Oberfläche isolirter Leiter; Dichte der Elektricität; Wirkung der Spitzen und Flammen; Tropfencollector. 57 Elektrisirt man eine isolirte leitende Kugel, so ist gar kein Grund vorhanden, warum sich die Elektricität auf deren Oberfläche ungleich vertheilen sollte. Die einzelnen Elektricitätselemente sind sich gegenseitig am entferntesten bei gleichmässiger Vertheilung. Es trifft daher auf jede Flächeneinheit der Oberfläche eine gleich grosse Elektricitätsmenge. Diese Menge, nach einer passenden Einheit gemessen, heisst man die Dichte der Elektricität. Auf einer Kugel ist daher die Dichte überall gleich gross.

Fig. 131.



Betrachten wir statt der Kugel einen langgestreckten Körper, z. B. einen Cylinder mit angesetzten Halbkugeln, wie Fig. 131 zeigt, so ist von vornherein klar, dass die sich abstossenden Elektricitätsmassen ihrer Tendenz, sich so weit als möglich von einander zu entfernen, dadurch entsprechen werden, dass sie sich an den beiden Enden des Cylinders anhäufen. Da aber die Theile jeder solchen Hälfte sich auch unter einander abstossen, so ist doch auch eine ausschliessliche Lagerung auf den Enden nicht möglich. Es wird vielmehr zu einer derartigen Anordnung kommen müssen, dass auf der ganzen Oberfläche sich Elektricität vertheilt findet, jedoch vorwiegend an den am meisten vorspringenden Stellen. Es ist in manchen Fällen möglich, durch allerdings oft schwierige und umständliche Rechnungen die Anordnung der Elektricität auf Grund des im vorigen Paragraphen erwähnten Coulomb'schen Gesetzes

zu bestimmen. Auf experimentellem Wege gelingt dies, wenn auch unvollkommen, durch Anlegen von Probekügelchen oder Probescheibchen, deren Ladung dann am Elektroskop geprüft wird. So fand z. B. Coulomb, als er mit Hülfe des Probescheibchens die Stärke der elektrischen Ladung an verschiedenen Stellen eines metallischen, an beiden Enden kugelförmig abgerundeten isolirten Cylinders, Fig. 131, von 20 cm Länge und 5 cm Durchmesser untersuchte:

die Ladung		1	in der Mitte
„	„	1,25	5 cm vom Ende
„	„	1,80	2,5 „ „ „
„	„	2,30	am Ende selbst.

Von der Mitte ausgehend, ändert sich also anfangs die Dichte nur wenig, nimmt aber nahe an den Enden in einem raschen Verhältnisse zu.

An einer isolirten, kreisförmigen metallischen Scheibe von 20 cm Durchmesser und 2 cm Dicke fand Coulomb die elektrische Dichte

in der Mitte	1
2,7 cm vom Rande	1,5
am Rande selbst	2,9

Auf solchen von der Kugelform abweichenden Körpern ist daher die Dichte der Elektricität an den einzelnen Stellen — die locale Dichte — verschieden gross. Die Menge der auf ihnen vorhandenen Elektricität, dividirt durch die Grösse der Gesammtoberfläche, giebt die mittlere Dichte auf denselben.

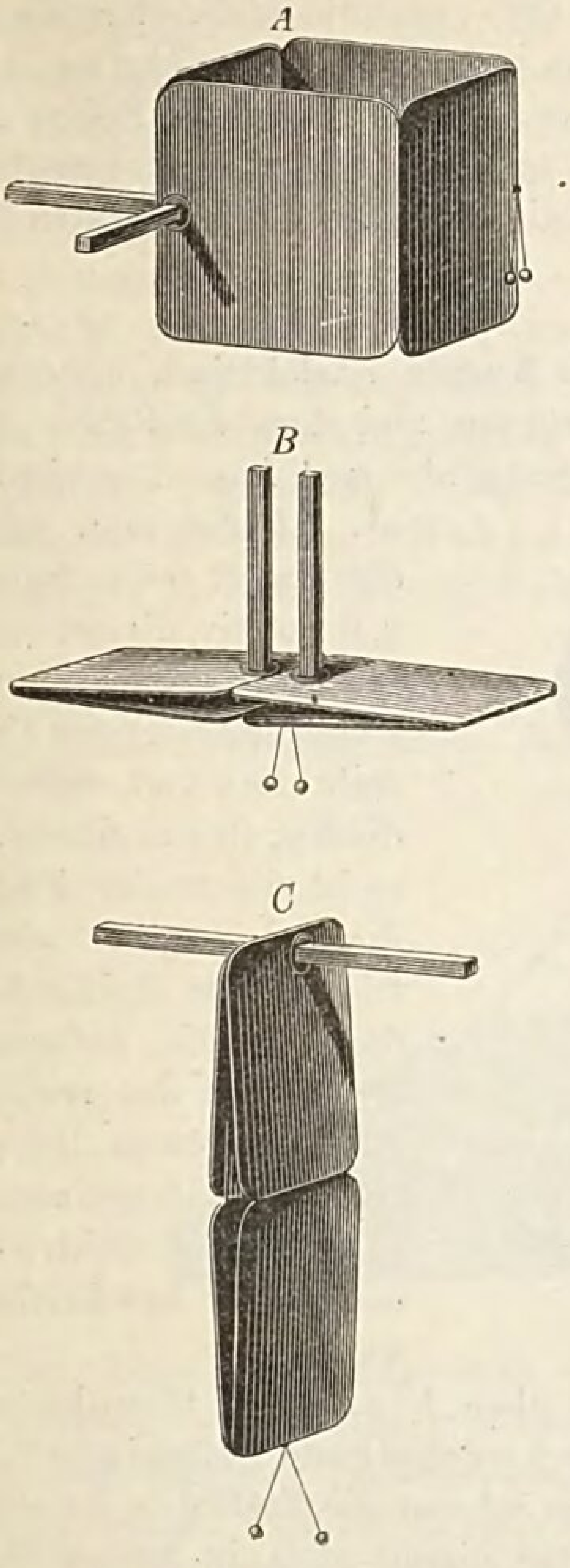
Wir machen darauf aufmerksam, dass Dichte der Elektricität und Potential derselben im Allgemeinen nicht zusammenfallen. Das Potential ist ja auf allen leitend verbundenen Stellen, so lange die Elektricität nicht in Bewegung ist, nothwendig dasselbe, die Dichte dagegen nicht.

Die Kraft, mit welcher die Elektricität nach aussen strebt, welche wir auch passend die Spannung nennen, hängt von der Dichte ab und ist derselben proportional. Das Potential ist seiner Definition nach eine Arbeitsgrösse (§. 52), also schon deshalb ein wesentlich anderer Begriff als Kraft oder Spannung. Dieser Sachverhalt wird weiter unten noch näher aufgeklärt werden.

Aus den vorangegangenen Betrachtungen ist zu folgern, dass die Dichte der Elektricität an allen vorspringenden Kanten, insbesondere Spitzen, welche an den isolirten Leitern angebracht werden, besonders gross sein muss, und zwar um so grösser, je kleiner der Winkel an der Kante und je schärfer die Spitze ist. In Folge dessen geht die Elektricität an solchen Stellen leicht an die umgebende Luft über, welche dabei gleichnamig geladen und durch Abstossung entfernt und erneuert wird (elektrischer Wind). Um die Wirkung der Kanten zu demonstriren, ist der von E. Mach construirte Apparat, welcher in Fig. 132 nach Weinhold abgebildet ist, geeignet.

Vier quadratische Pappstücke sind mit Stanniol überzogen, zu einem beweglichen Rahmen verbunden und mit isolirenden Handgriffen versehen. In der Mitte der einen Kante ist ein Doppelpendel von Hollundermarkkügelchen an leitenden Fäden angehängt, welches nach dem Elektrisiren des Ganzen verschieden stark divergirt, je nachdem die Kante, an der es hängt, einen spitzen oder stumpfen Winkel bildet.

Fig. 132.



Um die Spitzenwirkung zu demonstriren, stellen wir neben einander zwei isolirte Leiter in Kugelform, von denen der eine mit einer scharfen Spitze versehen werden kann, wie Fig. 133 (a. f. S.) zeigt.

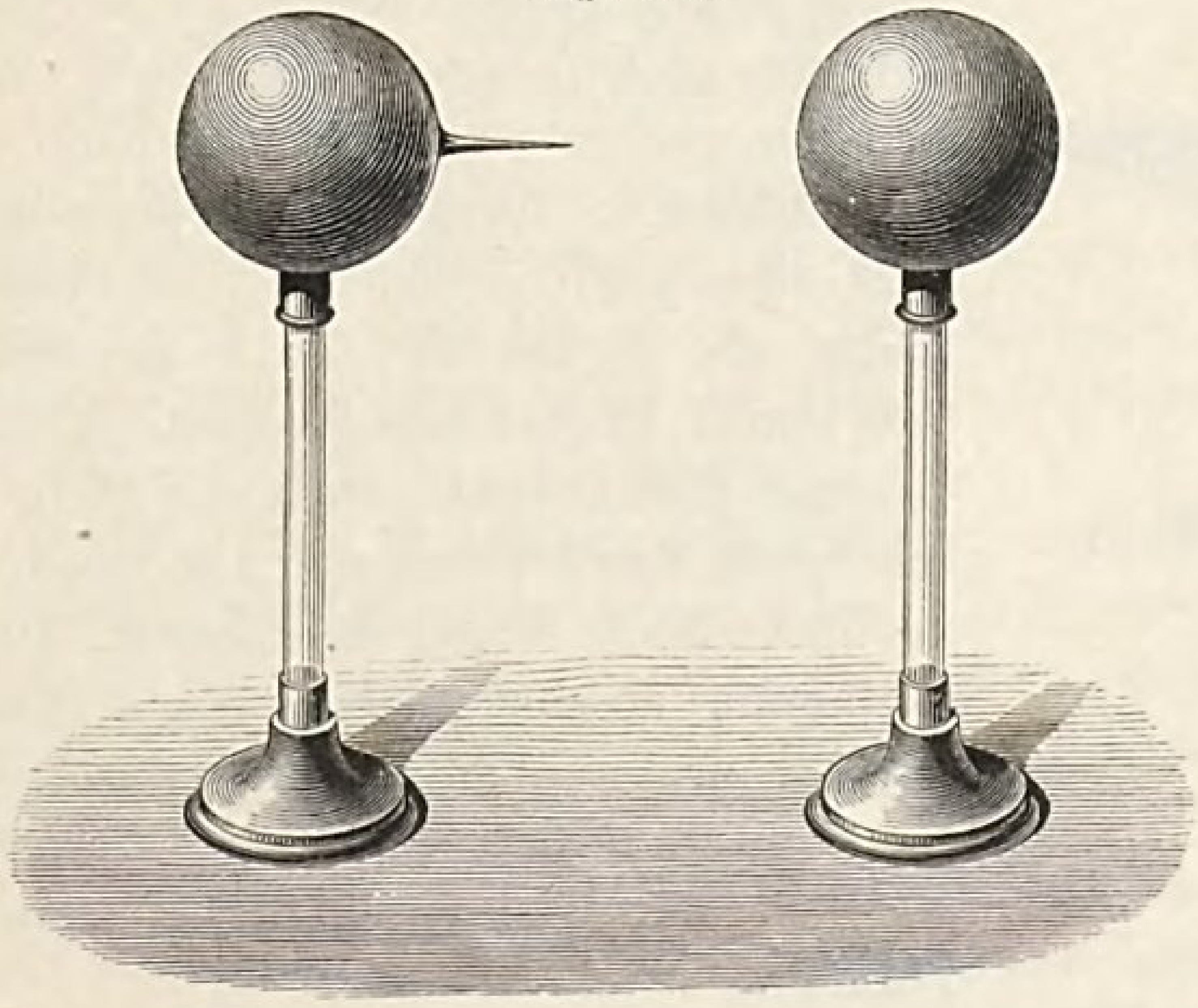
Erster Versuch. Man ladet beide Kugeln, ohne eingesetzte Spitze, stellt durch gegenseitige Berührung derselben eine gleich starke Ladung auf beiden her und entfernt dann die Kugeln von einander. Steckt man dann mittelst einer isolirten Pincette der einen Kugel die Spitze an, so kann man sich durch Probekügelchen und Elektroskop überzeugen, dass die Kugel mit Spitze ihre Ladung sehr viel rascher verliert als die Kugel ohne Spitze. Bei genügend starker Ladung kann man den Strom der abgestossenen Luft vor der Spitze fühlen und im Dunkeln daselbst eine Lichterscheinung wahrnehmen.

Zweiter Versuch. Man stellt die Kugeln unelektrisch neben einander, wie in Fig. 133, und ladet dann die mit der Spitze versehene Kugel beispielsweise mit positiver Elektricität. Man kann sich dann mit Probekugel und Elektroskop überzeugen, dass nach Entfernung der Kugeln die nicht mit Spitze versehene ebenfalls positiv elektrisch geworden ist. Dieselbe wurde ursprünglich durch Influenz gegen die Spitze hin negativ, an der abgewendeten Seite positiv elektrisch. Die Influenzelektricität erster Art wurde aber durch die gegen sie aus der Spitze ausströmende positive Eelektricität neutralisirt und es blieb demnach die Influenzelektricität der zweiten Art allein zurück.

Dritter Versuch. Man stellt die Kugeln wiederum unelektrisch einander gegenüber, elektrisirt dann aber jene, welche keine Spitze hat, beispielsweise positiv. Nimmt man dann die Spitze mittelst isolirter Pincette weg und entfernt die Kugeln von einander, so sind wiederum beide Kugeln positiv elektrisch. Es scheint also, als ob die Spitze im Stande wäre, die positive Elektricität der gegenüberstehenden Kugel anzusaugen und man spricht geradezu von der Saugwirkung der Spitzen. Man kann dies aber auch so auffassen, dass die Spitze die negative Influenzelektricität erster Art auf die influenzirende positive habe ausströmen lassen; dem zufolge die positive Influenzelektricität zweiter Art zurückgeblieben ist.

Vierter Versuch. Man stellt die Kugeln unelektrisch nahe zusammen, aber so, dass sie sich nicht berühren und dass die Spitze der einen Kugel nach der entgegengesetzten Seite, also nach Aussen, gerichtet ist. Ladet man dann die Kugel ohne Spitze z. B. positiv, nimmt dann die Spitze der anderen Kugel mit isolirter Pincette fort und entfernt die Kugeln von einander, so ist die zweite Kugel diesmal negativ elektrisch. Die Spitze hat diesmal die Influenzelektricität der zweiten Art ausströmen lassen.

Fig. 133



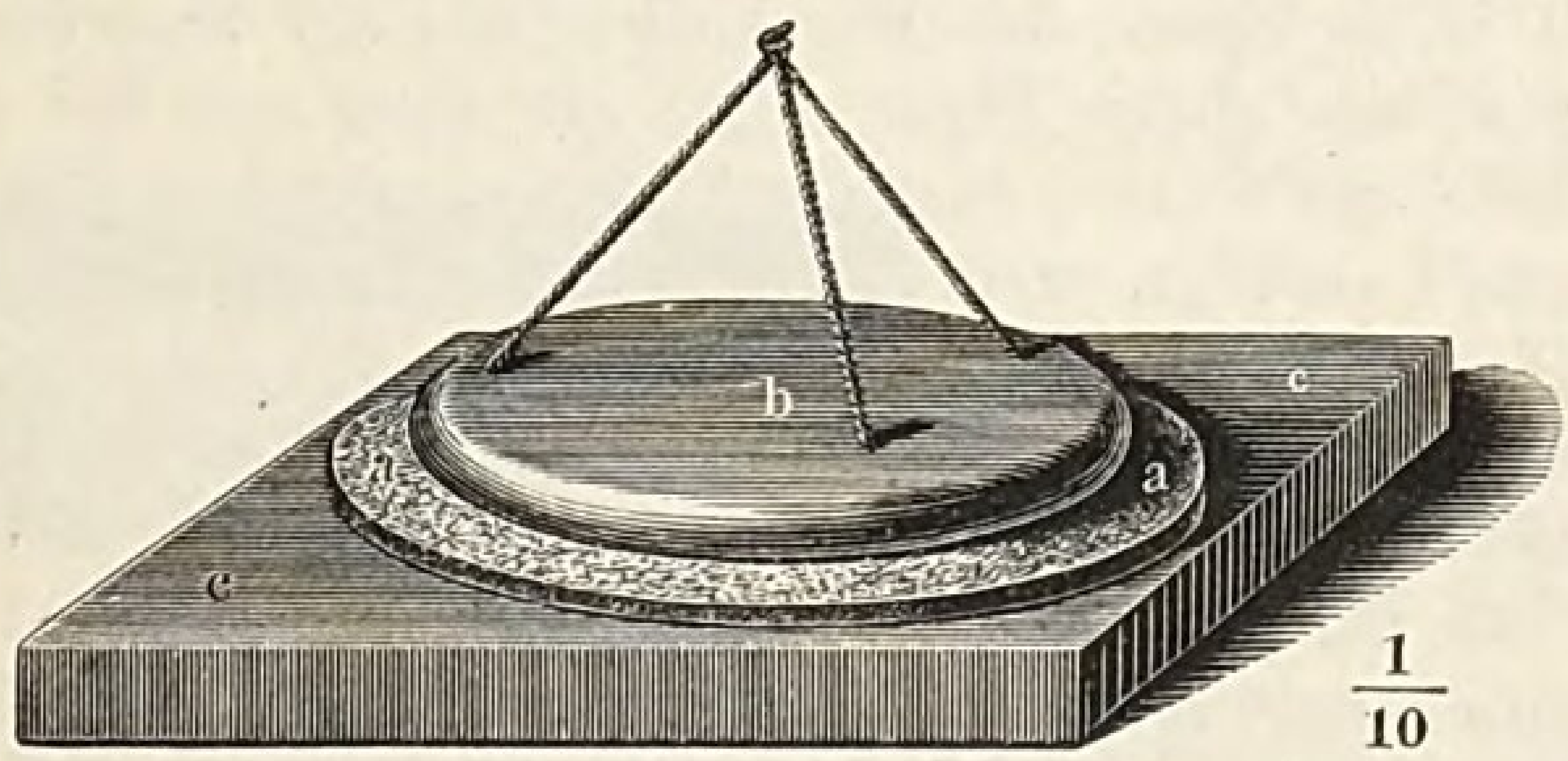
Weitere Experimente sollen bei der Elektrisirmaschine beschrieben werden.

Eine ähnliche Wirkung wie Spitzen üben Flammen, Rauchsäulen (von Lunten, Feuerschwamm, Räucherkerzchen) und Flüssigkeitsstrahlen aus. Die Wirkung der Flamme scheint die kräftigste zu sein. Ein mit einer Flamme verbundener Leiter nimmt stets in kurzer Zeit das Potential an, welches in der Umgebung der Flamme herrscht, wobei gar nicht erforderlich ist, dass diese Umgebung selbst eine elektrische Ladung enthalte, da das Potential auch durch die Influenz einer entfernteren Ladung hervorgebracht sein kann. Bringt man eine zur Erde abgeleitete Flamme mit der Oberfläche eines elektrisch gewordenen Körpers in Berührung, so muss derselbe hierdurch auf das Potential Null gebracht werden. Darauf beruht das sicherste Mittel, einen Körper unelektrisch zu machen, indem man ihn rasch durch eine Gas- oder Spiritusflamme hindurchzieht.

Befindet sich ein isolirtes Gefäss, welches einen in Tropfen zerfallenden Strahl Wassers oder Quecksilbers ausfliessen lässt, in einem Medium von abweichendem Potential, d. h. ist das Gefäss mit der Flüssigkeit in Bezug auf die Umgebung elektrisch, so wird sich die Ladung auf der Oberfläche ausbreiten und insbesondere auf der Spitze des ausströmenden Strahles sammeln. Da aber von dort die Ladung durch den abgehenden Tropfen entführt wird, so begreift man, dass sehr bald das Gefäss mit der zurückbleibenden Flüssigkeit seine Ladung verlieren, beziehungsweise auf das Potential der Umgebung gebracht werden muss. Ein mit dem Tropfgefäss leitend verbundenes Elektrometer muss daher sehr nahe das Potential des Ortes, wo sich die Tropfen bilden, anzeigen. Hierauf beruht W. Thomson's Tropfencollector. Derselbe besteht aus einem Blechgefäss, aus welchem durch ein Rohr, welches mit einer durch Bimsstein und Schwefelsäure getrockneten Luftschicht umgeben ist, das Wasser tropfenweise ausfliesst. Eines analogen, mit Quecksilber construirten Collectors bediente sich Nahrwoldt bei seinen später zu erwähnenden Versuchen über die Ladung staubhaltiger und staubfreier Luft.

Der Elektrophor. Nachdem wir die Lehre von der elektri- 58
schen Vertheilung sowie die Wirkung der Spitzen kennen gelernt

Fig. 134.



haben, können wir nun auch die Wirkungsweise derjenigen Apparate besprechen, welche man vorzugsweise benutzt, wenn es sich um Elektricitätsentwickelung in bedeutenderem Maassstabe handelt, das ist der Elektrophor und die Elektrisirmaschine.

Der von Wilke erfundene und von Volta verbesserte Elektrophor besteht aus einem Harzkuchen *a*, Fig. 134, welcher in eine metallene „Form“, gleichsam einen Teller von Metall, gegossen ist, oder auch nur, wie es unsere Figur zeigt, auf eine metallische Unterlage (ein mit Stanniol überzogenes Brett) *c* frei aufgelegt wird. Es ist sehr wesentlich, dass die Oberfläche des Harzkuchens möglichst eben sei. Auf diesen Harzkuchen, dessen Oberfläche durch Peitschen mit einem Fuchsschwanze oder einem Katzenpelze negativ elektrisch gemacht wird, setzt man einen mit einer isolirenden Handhabe versehenen oder an drei seidenen Schnüren hängenden Metalldeckel frei auf. Die $-E$ des Harz-

kuchens wirkt vertheilend auf die bis dahin noch verbundenen Elektricitäten im Deckel, die + *E* wird angezogen, die — *E* aber abgestossen; die + *E* wird sich deshalb im unteren, die — *E* im oberen Theil des Deckels anhäufen. Nähert man dem Deckel einen Finger, so springt ein Funke über, und wenn man den Deckel mit dem Finger berührt, so wird alle — *E* sich entfernen und der Deckel nur noch + *E* enthalten, die aber durch die — *E* des Harzkuchens gebunden ist, so lange der Deckel auf demselben liegen bleibt. Hebt man aber den Deckel von dem Kuchen ab, indem man ihn an den Schnüren in die Höhe zieht, so wird diese + *E* frei und man kann nun aus dem Deckel einen Funken positiver Elektricität ziehen.

Als Elektrophormasse wendet man gewöhnlich Schellack an, welchem so viel Wachs oder Terpentin zugesetzt wird, dass die Masse weniger spröde wird (etwa 1 Theil Wachs oder Terpentin auf 5 Theile Schellack). Böttger empfiehlt als sehr wirksam und wenig spröde eine Masse aus 5 Gewichtstheilen Schellack, 5 Theilen Mastix, 2 Theilen venetianischem Terpentin und 1 Theil Marineleim (einer aus Schellack, Steinkohlentheer und Kautschuk bestehenden Masse).

Wenn die Harzmasse in einen Teller von Blech eingegossen wird, so bekommt der Elektrophor leicht Risse, weil sich bei Temperaturveränderungen das Metall stärker ausdehnt und zusammenzieht als das Harz; deshalb ist es besser, den Harzkuchen frei auf die leitende Unterlage aufzulegen, wie unsere Figur zeigt; nur muss man bei dieser Vorrichtung dafür Sorge tragen, dass der Elektrophorkuchen stets auf einer ebenen Unterlage aufliegt, weil er sich sonst krümmt, wenn die Masse bei heissem Wetter weich wird.

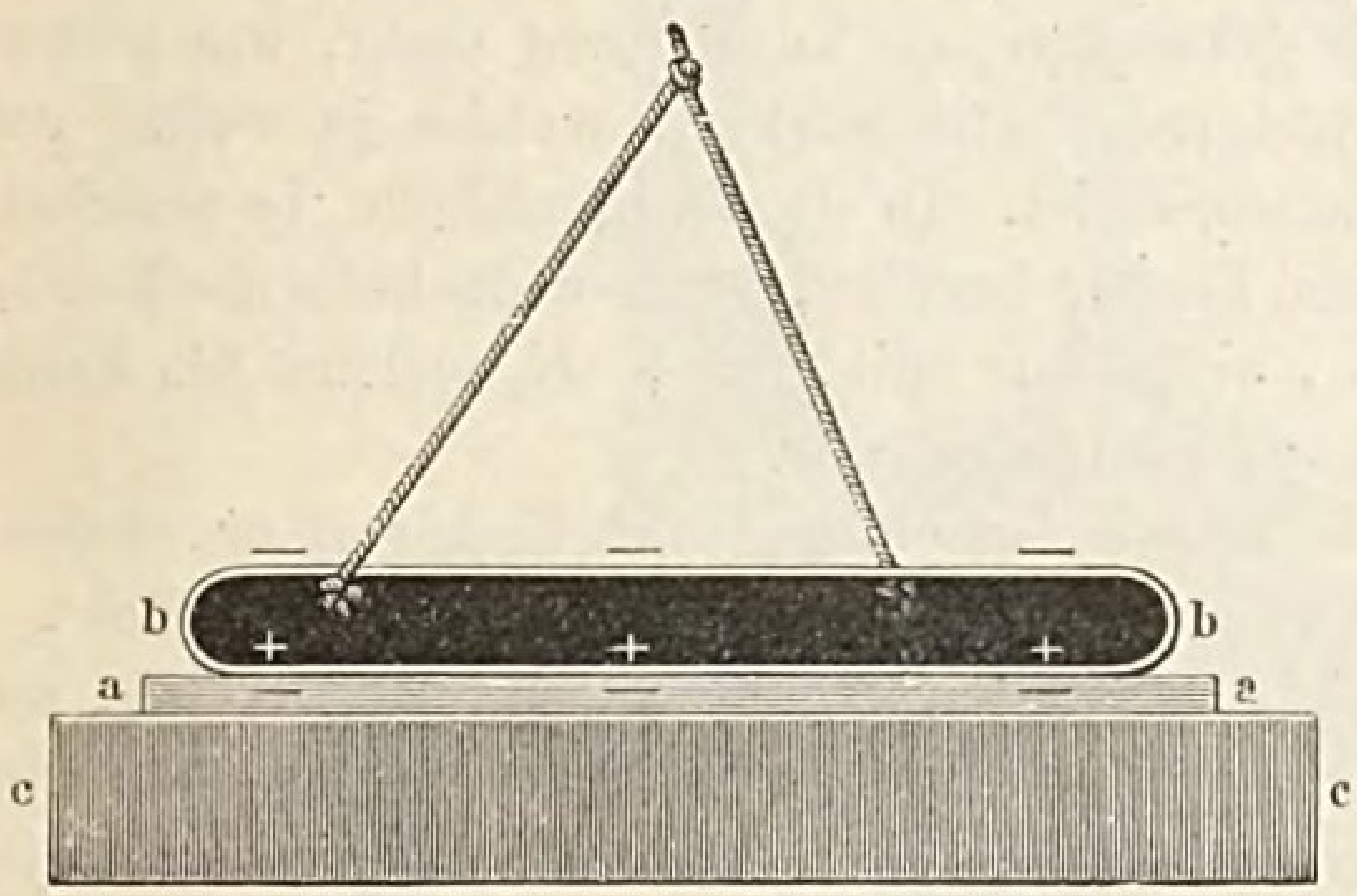
Statt der Harzkuchen hat man auch Platten von Guttapercha für Elektrophore angewandt, dieselben haben sich aber nicht gut bewährt, indem die Guttapercha sehr veränderlich ist und leicht ihre elektrischen Eigenschaften verliert. Dagegen wendet man mit dem besten Erfolge Hartgummi als Elektrophorkuchen an.

Der Deckel des Elektrophors ist in der Regel von Messing oder Zinn und mit einem abgerundeten Rande versehen. Man kann jedoch auch Deckel von Glas, Holz oder Pappe anwenden, die mit Stanniol überzogen sind; nur muss dafür gesorgt sein, dass die untere Fläche, welche auf den Harzkuchen zu liegen kommt, wie dieser selbst, möglichst eben ist.

Fig. 135 stellt eine der zweckmässigsten Gestalten des Elektrophordeckels dar. Er ist aus Zink- oder Messingblech verfertigt, innen hohl und ungefähr 4 bis 5 cm dick. Bei dieser Gestalt des Deckels lassen sich besonders die Schnüre gut anbringen, welche aber natürlich schon eingezogen werden müssen, bevor man die zwei Stücke zusammenlöthet, aus denen der Deckel besteht. In unserer Figur ist auch noch die Vertheilung der Elektricität angedeutet, welche in dem Deckel eintritt, wenn man denselben auf die negativ elektrische Harzplatte aufsetzt, ohne ihn ableitend zu berühren.

Wir haben oben nur gezeigt, wie es kommt, dass dem Deckel des Elektrophors eine Ladung positiver Elektricität ertheilt werden könne, ohne dass die Rede davon war, welche Rolle die „Form“ oder die untere Metallplatte dabei spielt. Wenn man den Harzkuchen auf eine isolirende Unterlage, etwa auf eine Glastafel, legte, so würde es nicht möglich sein, so starke Ladungen zu erhalten, wie es der Fall ist, wenn der Kuchen eine leitende Unterlage hat. Durch das Schlagen mit dem Pelze kann nämlich nur noch so lange Elektricität entwickelt werden, bis eine gewisse Grenze freier Ladung des Kuchens erreicht ist, über welche Grenze hinaus jede neu entwickelte — *E* des Kuchens sogleich zu ihrem Gegensatze im Pelz übergehen würde. Wenn aber der Harzkuchen auf einer leitenden Unterlage liegt, so wirkt die — *E* des Kuchens vertheilend auf dieselbe, die — *E* der Form wird abgestossen, die + *E* angezogen. Die + *E* der Form aber zieht auch die — *E* des Kuchens an und trägt dazu bei, dieselbe auf dem Kuchen zu binden. Wenn man einen Harzkuchen, der während des Schlagens mit Pelz auf einer leitenden Unterlage gelegen hat, aufhebt, so wird nun auf einmal alle *E* frei, welche durch den Einfluss der Unterlage auf dem Harze zurückgehalten war; man kann demselben zahlreiche kräftige Funken entziehen, welche während des Aufliegens nicht übersprangen.

Fig. 135.



Sehr leicht lässt sich dies mit jeder dünnen Elektrophorplatte zeigen. Ist sie auf einer leitenden Unterlage liegend, mit Tuch oder einem Felle gepeitscht worden, so kann man keine oder nur schwache Funken aus ihr ziehen, während sie lange Funken sprüht, sobald man sie von der leitenden Unterlage aufhebt.

Die Gesetze des Elektrophors lassen sich mit Hülfe eines dem Elektroskop, Fig. 123, ähnlichen, aber weniger empfindlichen Instrumentes nachweisen. Man lege auf die Platte des Elektroskops eine Scheibe von Schellack oder auch eine Platte von Hartgummi, deren Durchmesser noch etwas grösser ist als der Durchmesser der Metallplatte. Wenn, wie es sein muss, die Schellackscheibe ganz unelektrisch ist, so werden natürlich die Pendel nicht divergiren; sobald man aber die obere Harzfläche mit einem Katzenpelze schlägt, so divergiren die Pendel, und zwar mit — *E*, weil durch die — *E* auf der Oberfläche des Schellacks die + *E* des Apparates in der Metallplatte gebunden, — *E* aber abgestossen wird

Sobald man nun die Metallplatte des Elektroskops unten mit dem Finger berührt, wird die abgestossene $-E$ abgeleitet, die Pendel fallen zusammen; in der Metallplatte bleibt aber $+E$ gebunden, was man daraus erkennt, dass die Pendel mit $+E$ divergiren, sobald man die Schellackplatte abhebt, sogleich aber auch wieder zusammenfallen, wenn man sie wieder auflegt.

Die eben beschriebene Anordnung stellt uns einen vollständigen Elektrophor dar, die Schellackscheibe ist der Harzkuchen, die Platte des Elektroskops ist die Form. Bei dieser Anordnung des Versuchs ist es nun, wie wir gesehen haben, leicht, jederzeit den elektrischen Zustand der Form nachzuweisen.

Sobald man auf die obere Fläche der Schellackscheibe eine, durch eine Glasstange isolirte Metallscheibe, welche der Platte des Elektroskops ganz gleich ist und dem Deckel des Elektrophors entspricht, aufsetzt und mit dem Finger berührt, verändern sich die Umstände. In dem Moment, in welchem man aus der oberen Deckplatte die $-E$ ableitet, so dass sie nur noch $+E$ enthält, wird die $-E$ des Harzkuchens durch die $+E$ im Deckel vollständig gebunden, sie kann nicht mehr, wie früher, bindend auf die $+E$ der unteren Platte wirken, welche ja weiter von der geriebenen Oberfläche entfernt ist. In dem Augenblicke, in welchem man die obere Platte mit dem Finger berührt, werden deshalb die Pendel des Elektroskops divergiren, und zwar mit der $+E$, welche bis dahin in der Platte des Elektroskops gebunden war.

Dies erklärt nun auch eine Erscheinung am Elektrophor, welche bisher noch nicht erwähnt wurde. Wenn man nämlich den Deckel gehörig aufgesetzt hat und gleichzeitig mit einem Finger den Deckel, mit einem anderen die Form berührt, so erhält man einen Schlag, der weit heftiger ist, als wenn man nur den Deckel berührte. Es kommt dies daher, dass die $-E$ des Deckels und die frei werdende $+E$ der Form zu einander übergehen.

59 **Die Reibungselektrisirmaschine** besteht aus einem zu reibenden Körper, einem Reibzeuge und einem isolirten Leiter.

Das Reibzeug ist gewöhnlich ein Stück Leder, welches mit Amalgam überzogen ist.

Der zu reibende Körper ist eine Glasscheibe oder ein Glascylinder, manchmal eine Ebonitscheibe.

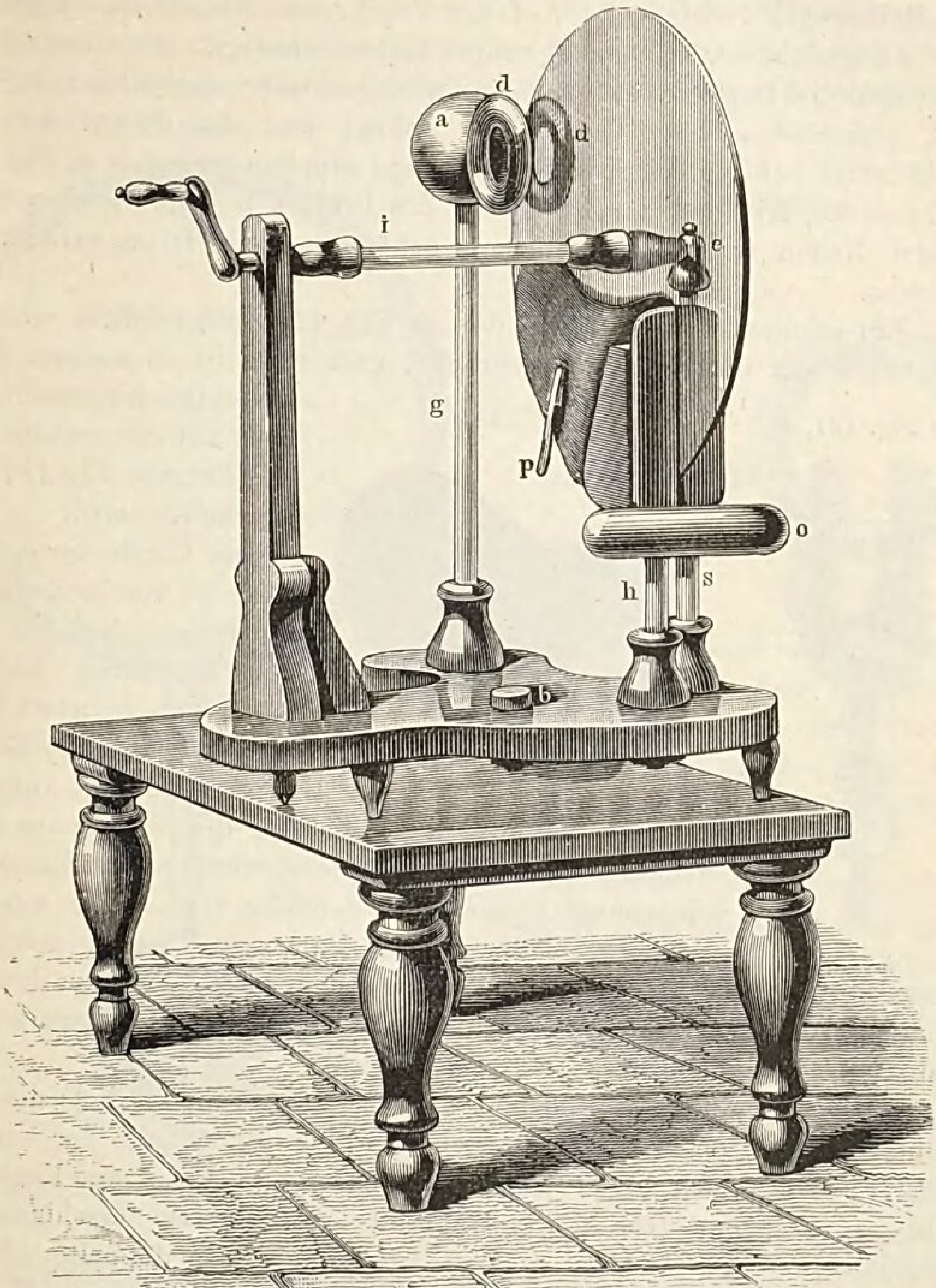
Der isolirte Leiter oder Conductor ist in der Regel durch Hohlkugeln oder hohle Cylinder aus Messingblech gebildet, welche an beiden Seiten kugelförmig abgerundet und von gläsernen, mit Schellackfirniss überzogenen Säulen getragen werden.

Man hat der Elektrisirmaschine mancherlei verschiedene Einrichtungen gegeben.

Fig. 136 stellt eine Scheibenmaschine dar, wie sie der seither verstorbene Winter in Wien construirt hat, dessen Elektrisirmaschinen,

namentlich in Beziehung auf Funkenlänge, Ausgezeichnetes leisten. Die Umdrehungsaxe *i* der Scheibe ist von Glas; sie wird auf der einen Seite durch den Glasfuss *s*, auf der anderen durch eine hölzerne Stütze getragen.

Fig. 136.



Das Gestell, welches zur Aufnahme des Reibzeuges dient, ist Fig. 137 (a. f. S.) für sich allein dargestellt. Auf den Glasfuss *h* ist das gabelförmige Holzstück *n* aufgekittet, in welches auf jeder Seite eine Vertiefung zur Aufnahme des Reibzeuges eingeschnitten ist. Ein an diesem Holzgestell *nn* angebrachter Streifen von Messingblech führt die negative

Elektricität des Reibzeuges zu dem Loch *r*, in welches der kleine Conductor *o*, Fig. 136, eingesteckt wird.

Das Reibzeug selbst ist in Fig. 138 dargestellt, und zwar von der Rückseite; *p* ist ein Schieber von Holz, welcher in das Reibzeuggetsell eingeschoben wird; *q* ist eine Leiste, welche das Durchschlüpfen des Reibzeuges verhindert. Auf der Vorderseite des Brettes *p* ist das mit ihm gleichgestaltete amalgamirte Leder befestigt. An dieses Leder setzt sich ein Lappen von Wachstaffet an, welcher nochmals mit Schellack gefirnisst an der Glasscheibe anliegt und das Entweichen der Elektricität auf dem Wege vom Reibzeuge zum Saugapparate *d*, Fig. 136, verhindert. Die auf der Rückseite des Brettes *p* angebrachten Stahlfedern dienen dazu, das Reibzeug gehörig an die Glasscheibe anzudrücken.

Ein solches Reibzeug, wie das in Fig. 138 dargestellte, wird auf jeder Seite der Glasscheibe angebracht, und zwar ist in unserer Figur dasjenige dargestellt, welches auf der rechten Seite des Trägers, Fig. 137, eingeschoben wird.

Fig. 137.

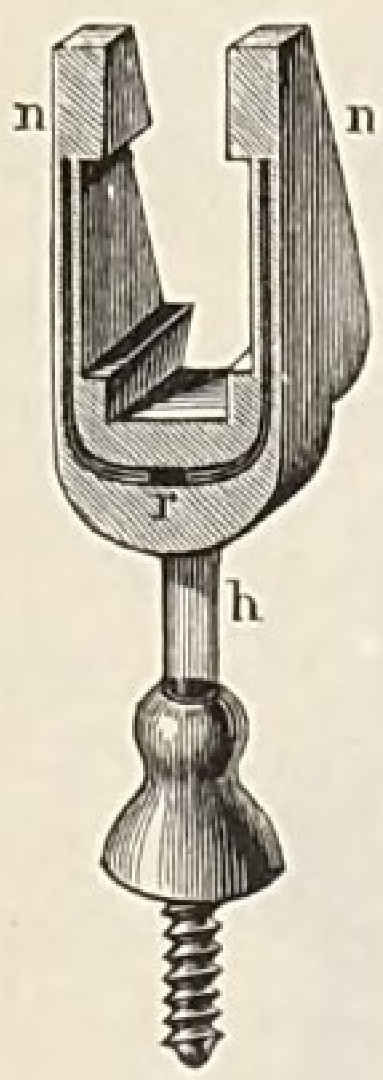
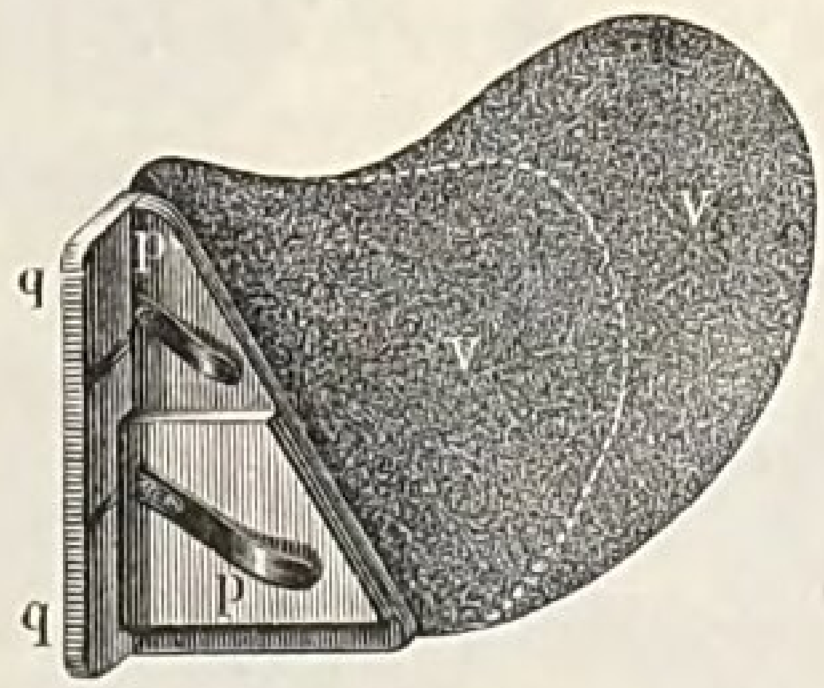


Fig. 138.



Der Conductor *a*, Figur 136, ist von Messingblech verfertigt. Bei den neueren Maschinen ist derselbe von polirtem Holze und mit einigen Stanniolstreifen belegt. Angeblich aus dem Grunde, dass die auf dem Conductor *a* angehäufte Elektricität möglichst wenig an der Glassäule *g* abströmen könne, hat derselbe eine schon von van Marum bei der grossen Harlemer Maschine mit Erfolg angewandte Form, die man Fig. 139 deutlicher sieht, welche den Conductor *a* im Durchschnitt sammt einem aufgesteckten Holzring zeigt. Die Kugel *a* ist nämlich unten eingezogen*).

In den Conductor *a* sind mehrere Blechhülsen eingelöthet; die obere dient, um den Holzring aufzustecken; von der linken Seite her wird bei grösseren Maschinen ein Stäbchen eingeschoben, welches eine Kugel von 5 bis 8 cm Durchmesser trägt, während bei kleineren Maschinen eine Blechhülse eingesteckt wird, welche, wie Fig. 140 in doppeltem Maassstabe zeigt, mit einem schwach gekrümmten runden Stück von Messingblech endigt. Wenn man kräftige Funken aus dem Conductor ziehen will, so wird das Röhrchen, Fig. 140, so weit eingeschoben, dass das Blech *v* dicht an dem Conductor anliegt und nur eine unbedeutende

*) Dass dieser Grund nicht stichhaltig ist, folgt aus dem in §. 56 am Schlusse des ersten Versuchs Gesagten.

Hervorragung an demselben bildet; will man aber irgend einen Gegenstand an den Conductor anhängen oder elektrische Büschel aus demselben ziehen, so wird das Röhrchen, Fig. 140, mit dem Blech *v* mehr oder weniger aus dem Conductor hervorgezogen. — Auf der rechten Seite des Conductors, Fig. 139, wird die Saugvorrichtung eingesteckt.

Diese Saugvorrichtung hat bei den Winter'schen Maschinen eine ganz eigenthümliche, sehr zweckmässige Einrichtung; sie besteht nämlich aus zwei Ringen von polirtem Holze, welche an der Innenseite, da

Fig. 139.

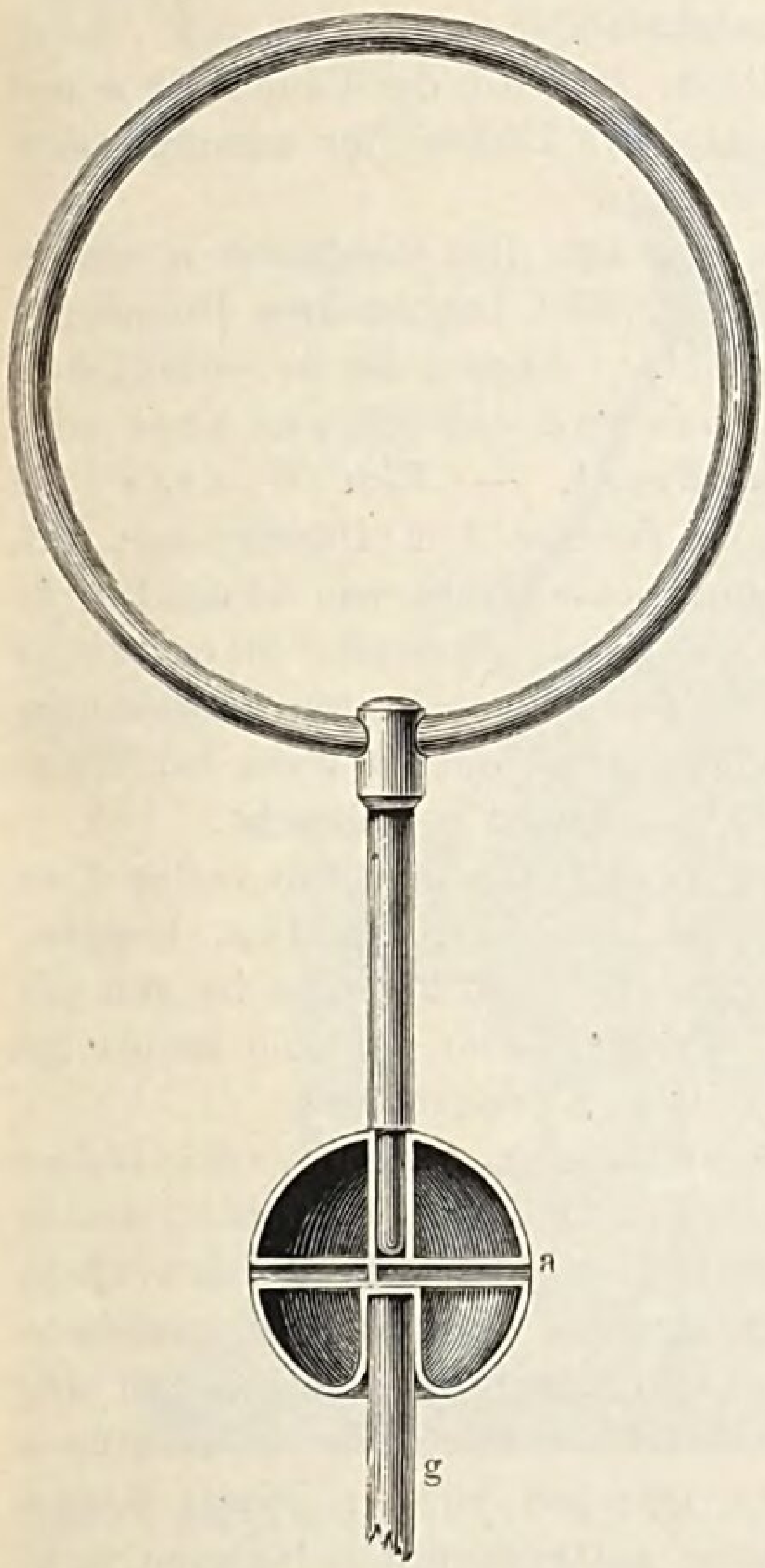


Fig. 140.

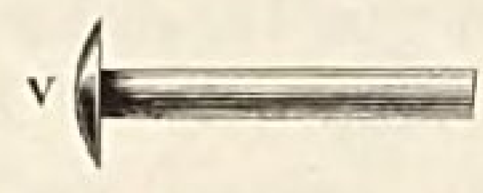
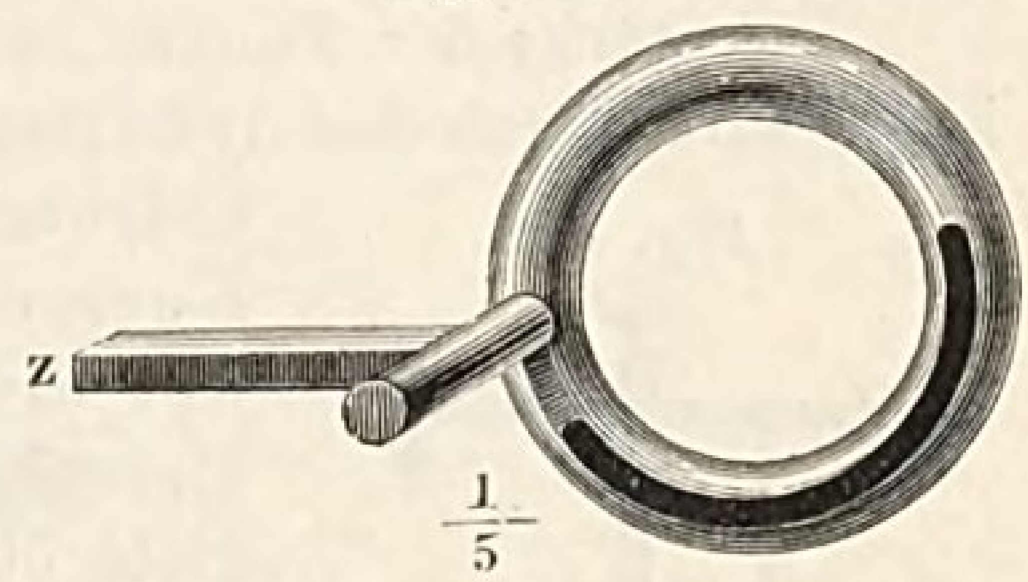


Fig. 141.



wo die Scheibe sich zwischen ihnen durchbewegt, mit einer Rinne versehen sind, wie man dies Fig. 141 sieht, wo der vordere Ring weggelassen ist, damit man die Rinne des hinteren sehen kann.

Der Boden dieser Rinne ist mit Stanniol beklebt, aus welchem eine Reihe feiner Nadelspitzen gegen die Scheibe gerichtet hervorragen. Das metallische Stäbchen *z*, Fig. 141, mittelst dessen die Saugvorrichtung an den Conductor angesteckt wird, ist ebenso wie die Hülse, in die es passt, eckig, damit eine Drehung um seine Axe nicht möglich ist. Die Rinne ist durch ein Stanniolstreifchen mit *z*, also auch mit dem Conductor *a* metallisch verbunden.

Beim Drehen wird die Glasscheibe zwischen dem Reibkissen + elektrisch. Damit sich nun auf dem Wege von dem Reibzeuge zu den Saugern die Elektricität nicht von der Scheibe verliere, sind die bereits erwähnten Lappen von Wachstaffet angebracht, welche, wie wir gesehen haben, am Reibzeuge befestigt sind. So kommen denn die beim Drehen zwischen den Reibkissen + elektrisch gewordenen Stellen der Scheibe

zwischen die Holzringe, die + E der Scheibe wirkt vertheilend auf die Spitzen, die + E wird abgestossen und auf den Conductor a getrieben, während die — E aus dem Conductor durch die Spitzen auf die Scheibe strömt, um sie wieder in natürlichen Zustand zu versetzen.

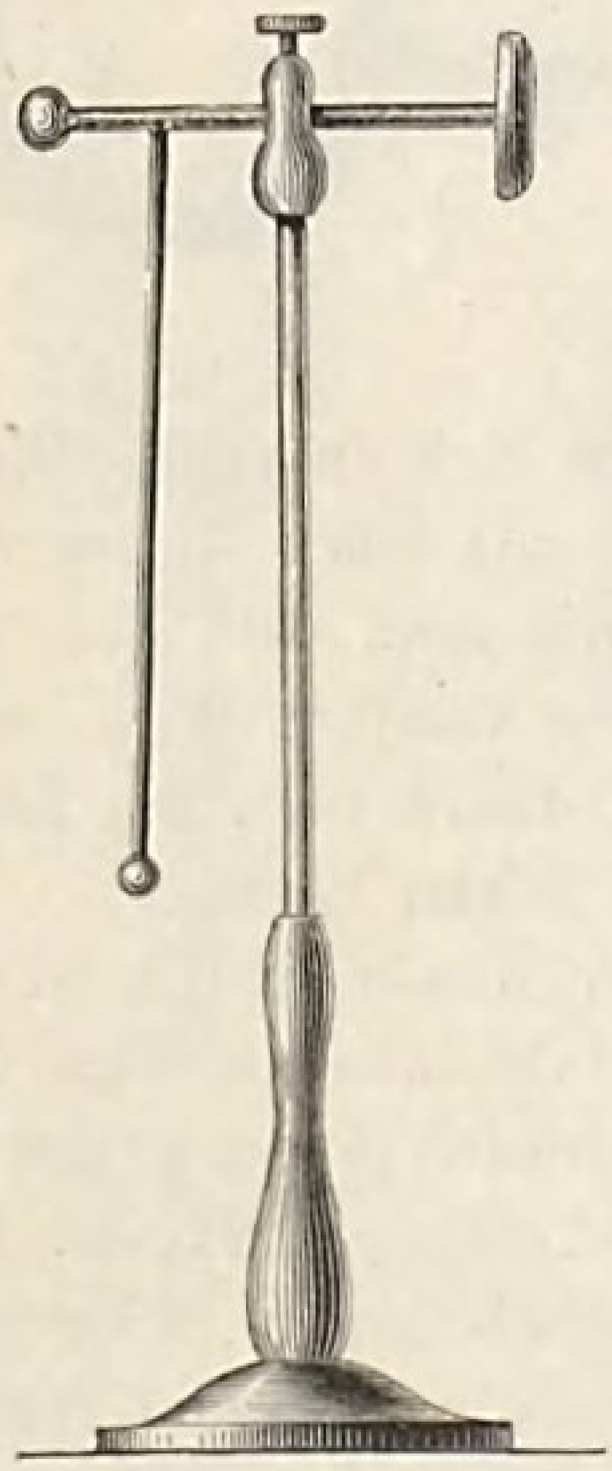
So wird denn der Conductor a mit positiver Elektricität geladen.

Damit fortwährend eine starke Elektricitätsentwickelung möglich ist, muss die auf dem Reibzeuge entwickelte — E möglichst vollständig abgeleitet werden, das Reibzeug muss deshalb mit dem Boden oder noch besser mit einer grossen Metallmasse (wo es möglich ist, mit Gasleitungsröhren) in gut leitender Verbindung stehen.

Will man mit — E experimentiren, so wird der Conductor a mit dem Boden leitend verbunden; die negative Elektricität sammelt sich alsdann auf dem Conductor o des Reibzeugs.

Die Stärke der Funken, welche man aus dem Conductor a ziehen kann, wird durch das Aufsetzen des in Fig. 139 dargestellten Holzringes bedeutend erhöht. Aussen ist er polirt; den Kern des Stabes und des Ringes aber bildet ein Eisendraht. — Eine Winter'sche Maschine, deren Scheibe 1 m Durchmesser hat, giebt 60 cm lange, eine solche von 45 cm Durchmesser giebt in gutem Zustande 30 cm lange Funken. Bei der nach seinem System umgebauten Maschine des Polytechnicums zu Wien hat Winter die Funkenlänge auf 1 m gebracht.

Fig. 142.



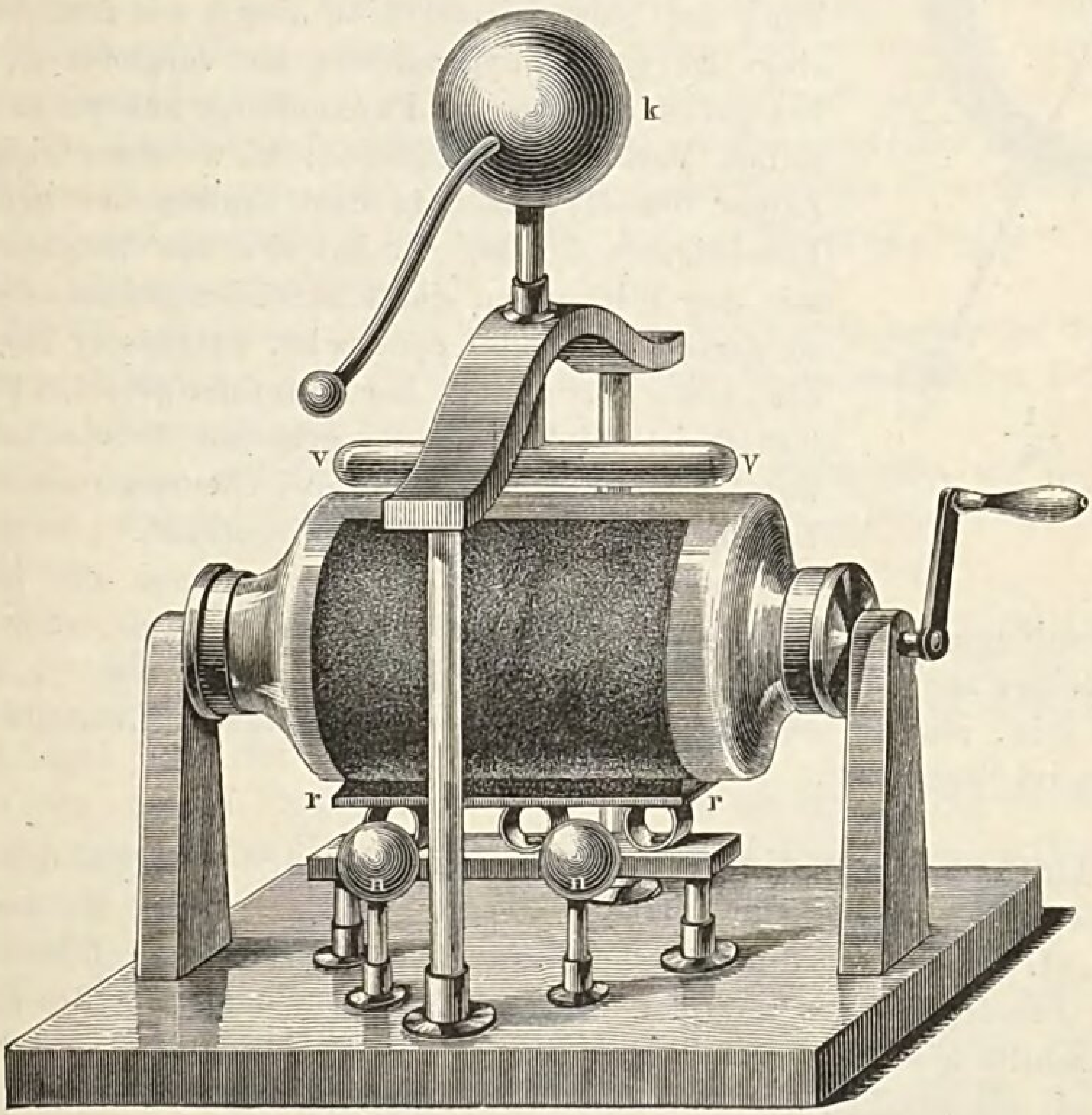
Um grosse Funken aus dem Conductor a zu ziehen, ist der Funkenzieher, Fig. 142, bequem, welcher auf einem Glasfusse befestigt ist und mit dem Boden oder noch besser mit dem Reibzeuge in leitende Verbindung gesetzt wird.

Fig. 143 stellt eine Cylindermaschine dar, wie sie Grüel in Berlin construirt, dessen Elektrisirmaschinen sich gleichfalls durch kräftige Wirkung auszeichnen. Hier ist der geriebene Körper ein grosser Glascylinder, welcher um eine horizontale Axe drehbar ist und in seiner ganzen Länge durch ein einziges Kissen $r\,r$ gerieben wird. Dieses Kissen kann mit den kleinen, durch Glasfüsse getragenen Conductoren n in leitende Verbindung gesetzt werden. Der Conductor besteht aus dem mit Saugspitzen besetzten Messingcylinder $v\,v$, welcher dem Reibzeuge diametral gegenübersteht, und der Hohlkugel k, welche mit $v\,v$ leitend verbunden ist und an einem etwas gebogenen Messingrohre noch eine kleinere Kugel trägt.

Damit das am Reibzeuge geriebene Glas auf dem Wege bis zum Conductor v seine Elektricität nicht verliert, ist die eine Hälfte des Cylinders mit einem Stück Wachstaffet bedeckt, welches am Reibzeuge r befestigt ist.

Um über den Grad der Ladung des Conductors einigermaassen ein Urtheil zu haben, setzt man auf denselben das Henley'sche Quadrantenelektrometer, Fig. 144 (a. f. S.) (nicht zu verwechseln mit dem später zu beschreibenden Thomson'schen Quadrantenelektrometer), dessen Einrichtung schon aus der Figur ersichtlich ist. Je stärker die Ladung wird, desto mehr wird das an einem Strohhalm steckende Korkkügelchen *d* abgestossen, desto mehr steigt es. An einem getheilten Halbkreise, den unsere Figur von der Rückseite zeigt, kann man sehen, um wie viel Grade sich der Strohhalm, welcher die kleine Kugel trägt, von seiner Gleichgewichtslage entfernt hat. Diese Gradzahl ist

Fig. 143.

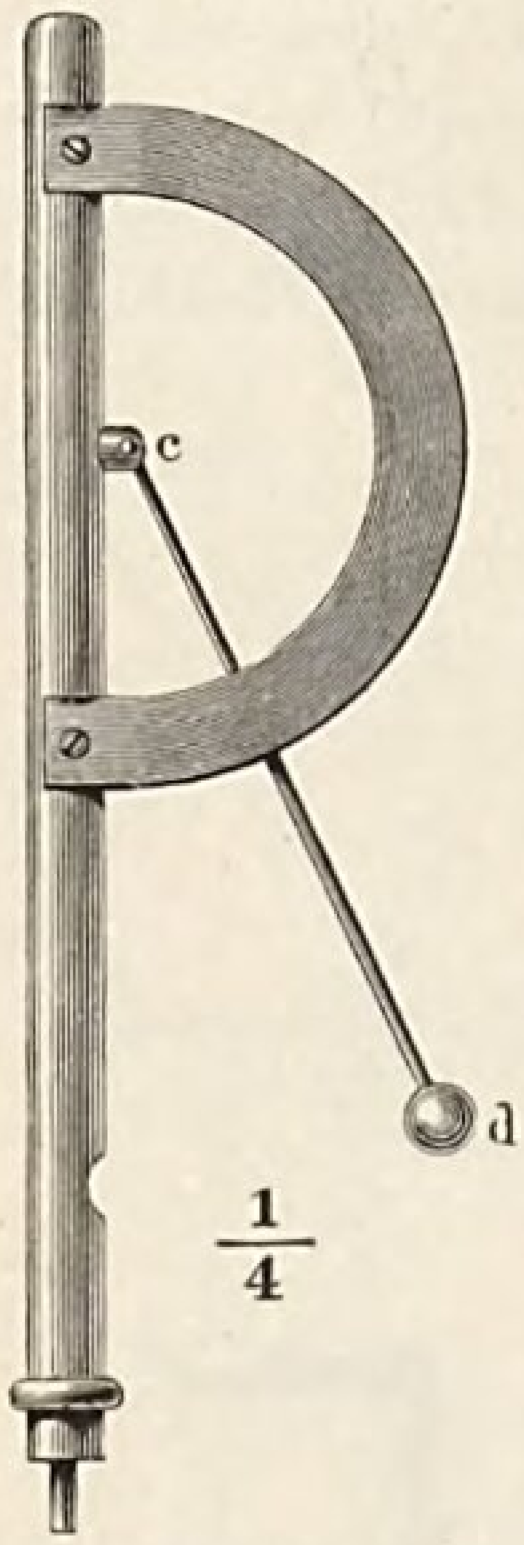


jedoch nicht der elektrischen Spannung auf dem Conductor proportional. Wenn man die Maschine zu drehen anfängt, steigt das Kügelchen rasch, bald aber erreicht es eine Stellung, welche es fast ganz unverändert beibehält, so lange man dreht. Es zeigt dies, dass ungeachtet der fortwährenden Elektricitätsentwickelung die Spannung auf dem Conductor nicht mehr zunimmt. Der Grund davon liegt darin, dass, so gut man den Conductor auch isoliren mag, er doch fortwährend Elektricität verliert. Dieser Verlust ist nun um so grösser, je grösser die Spannung der Elektricität ist; begreiflicher Weise wird bei fortgesetztem Drehen bald ein Zeitpunkt eintreten, wo die Spannung auf dem Conduc-

tor so gross ist, dass der elektrische Verlust in jedem Zeittheilchen gleich ist der Elektricitätsmenge, welche in derselben Zeit dem Conductor zugeführt wird.

Die Grösse der möglichen Ladung eines Conductors hängt namentlich auch von der Witterung ab. Bei feuchter Witterung, wo der elektrische Verlust sehr bedeutend ist, kann man dem Conductor keine so starke Ladung ertheilen, wie bei trockenem Wetter, wie man dies namentlich sehr deutlich mit dem Quadrantenelektrometer zeigen kann.

Fig. 144.



Winter ist auf die Idee gekommen, die Wirkung der Elektrisirmaschine direct mit dem Stande eines Darmsaitenhygrometers zu vergleichen, und hat gefunden, dass die Funkenlänge nahezu in demselben Verhältniss abnimmt, in welchem sich der Zeiger des Hygrometers dem Punkte der grössten Feuchtigkeit nähert. Er hat sich zur Vergleichung mit den Wirkungen der Elektrisirmaschine ein besonderes Hygrometer construirt, welches er Hygroelektrometer nennt. Der Punkt der grössten Feuchtigkeit ist mit 0, der der grössten Trockenheit ist mit 16 bezeichnet und der Zwischenraum des Gradbogens in 16 gleiche Theile getheilt. Steht der Hygrometerzeiger auf 16, so hat man die grösste Funkenlänge zu erwarten, welche die Maschine geben kann, steht aber der Zeiger auf 8, auf 4, so werden die Funken ungefähr nur $^1/_2$, $^1/_4$ so lang sein, als sie die Maschine unter den günstigsten Umständen zu geben im Stande ist.

60 **Dampfelektrisirmaschine.** Im Jahre 1840 machte der Engländer Armstrong eine ebenso interessante als wichtige Entdeckung bekannt. Man hatte ihn benachrichtigt, dass in der Nähe von Newcastle beim Ausströmen des Dampfes aus einer Fuge in der Nähe des Sicherheitsventils eine ungewöhnliche elektrische Erscheinung beobachtet worden sei; als nämlich der Maschinenwärter zufällig die eine Hand in den Dampfstrahl hielt und mit der anderen nach dem Hebel des Ventils fasste, um die Belastung desselben zu reguliren, schlug ein Funke zwischen dem Hebel und seiner Hand über, während er zugleich einen starken elektrischen Schlag erhielt.

Armstrong fand diese Angaben bestätigt und beobachtete bald an anderen Dampfkesseln ähnliche Erscheinungen.

Den ausströmenden Dampf fand er positiv elektrisch.

An einer Locomotive, welche auf eine isolirende Unterlage gestellt war, fand Armstrong, dass dieselbe eine starke Ladung negativer Elektricität erhielt, wenn man die positive Elektricität des ausströmen-

den Dampfes gehörig ableitete, und zwar so, dass man sehr kräftige Funken aus der Locomotive ziehen konnte.

Anfangs war man der Meinung, die Elektricitätsentwickelung möchte wohl durch die Bildung des Dampfes oder seine nachherige Condensation veranlasst werden, und hoffte, dass die neu entdeckte Erscheinung vielleicht zur Aufhellung des Dunkels beitragen möchte, in welches noch die Entstehung der atmosphärischen Elektricität gehüllt ist.

Nach späteren, namentlich von Faraday angestellten Versuchen ist jedoch wohl kein Zweifel mehr, dass die Quelle dieser Elektricität die Reibung des mit Gewalt ausströmenden Dampfes an den Wänden der Oeffnung ist.

Armstrong hat die beim Ausströmen des Dampfes frei werdende Elektricität zur Construction einer Elektrisirmaschine benutzt, welche er Hydroelektrisirmaschine nennt. Eine kolossale Maschine der Art hat er für das Polytechnische Institut zu London anfertigen lassen.

Dieser Apparat besteht aus einem cylinderförmigen Dampfkessel von 1,1 m Durchmesser und 2 m Länge mit innerer Heizung, welcher durch 6 starke Glasfüsse isolirt ist.

Der Dampf entweicht aus 46 durch Hähne verschliessbaren Röhren, an deren Mündung ein Röhrchen von hartem Holze eingesetzt ist, wodurch die Wirkung sehr verstärkt wird.

Der Dampf strömt gegen eine Reihe von Metallspitzen, die mit dem Boden in leitender Verbindung stehen, um die Elektricität des Dampfes abzuleiten.

Fig. 145 (a. f. S.) stellt eine solche Dampfelektrisirmaschine dar, deren Kessel 44 cm im Durchmesser hat, und 96 cm lang ist. Die Feuerung ist innen angebracht, wie man in Fig. 145 durch die geöffnet gezeichnete Thür des Feuerungsraumes sieht.

Oben auf dem Dampfkessel befindet sich ein Hut, auf welchem ein kurzes, durch einen Hahn *t* verschliessbares Messingrohr befestigt ist; auf dieses kurze Rohr können dann die Ausströmungsöffnungen aufgeschraubt werden, die alsbald näher beschrieben werden sollen.

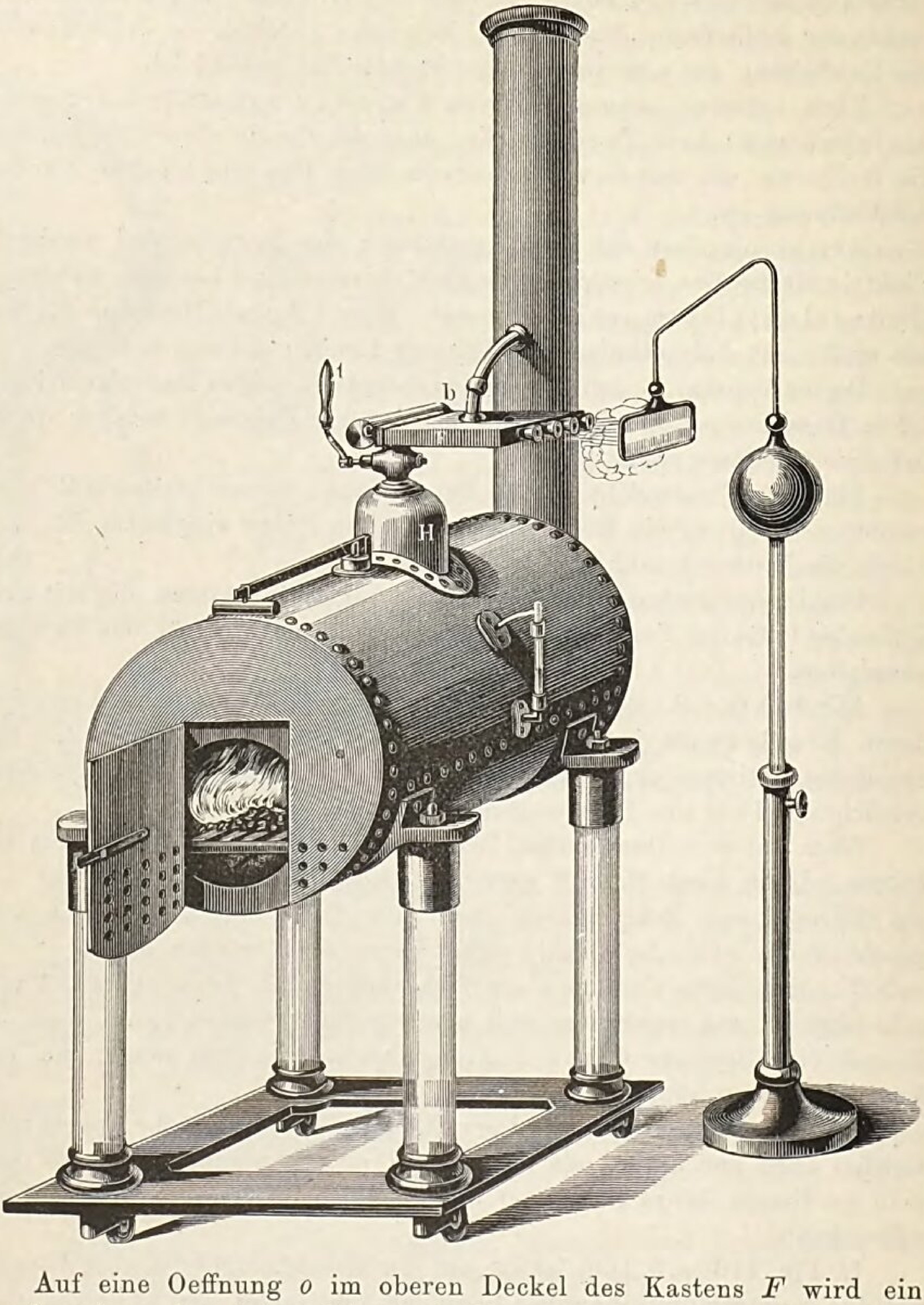
Vor dem Hute sieht man ein Sicherheitsventil, dessen Gewicht verschiebbar ist und welches so weit herausgerückt werden kann, dass der Dampf eine Spannkraft von 6 Atmosphären erreichen muss, um das Ventil heben zu können.

Auf der rechten Seite des Dampfkessels ist ein Glasrohr angebracht, welches oben and unten mit dem Kessel in Verbindung steht, so dass man an diesem Rohre gerade so wie bei Locomotiven den Wasserstand sehen kann.

In Fig. 146 (a. S. 169) ist der auf den Kessel aufgeschraubte Apparat mit den Ausströmungsöffnungen besonders abgebildet, und zwar von oben gesehen. Auf den Hals des Dampfkessels wird ein gusseisernes Rohr *bc* von ungefähr 24 cm Länge und 5 cm Durchmesser aufgeschraubt. Aus diesem Rohre tritt dann der Dampf durch sechs horizontale Röhren *ad* aus,

welche durch einen mit kaltem Wasser gefüllten Kasten *F* von Messingblech hindurchgehen, so dass ein Theil des durch die Röhren strömenden Dampfes condensirt wird, was die Wirkung sehr verstärkt.

Fig. 145.



Auf eine Oeffnung *o* im oberen Deckel des Kastens *F* wird ein Messingrohr aufgesetzt, welches, wie Fig. 145 zeigt, in den Schornstein führt und durch welches die im Kasten *F* gebildeten Dämpfe entweichen.

Fig. 147 stellt eine der in Fig. 146 mit *d* bezeichneten Ausströmungsöffnungen im Durchschnitt und zwar in $^1/_2$ der natürlichen Grösse

dar. An das Ende des Rohres wird ein Messingstück *MN* eingeschraubt, in welchem der das Ende der Ausströmungsröhre bildende Holzpflock *abcd* steckt. Dieser der Länge nach durchbohrte Holzcylinder wird durch einen in das Messingstück *MN* eingeschraubten kurzen Messingcylinder *r* an seiner Stelle festgehalten. An diesem gleichfalls durchbrochenen Cylinder *r* ist vorn vor seiner Oeffnung eine Messingplatte so angebracht, dass der Dampf den durch den Pfeil bezeichneten Umweg machen muss, um in die Ausströmungsöffnung zu gelangen.

Wenn der Apparat, Fig. 146, auf den Dampfkessel aufgeschraubt ist und der Dampf die nöthige Spannkraft hat, wird durch eine Viertelumdrehung des Handgriffs *t*, Fig. 145, der Absperrhahn geöffnet, der Dampf strömt mit Gewalt aus den sechs Oeffnungen hervor, und alsbald wird auch der Kessel elektrisch. Der entweichende Dampf hat die entgegengesetzte Elektricität wie der Kessel; um aber eine möglichst starke Wirkung zu erhalten, muss die Elektricität des Dampfes möglichst abgeleitet werden; dies geschieht dadurch, dass man in den Dampfstrom eine Reihe von Metallspitzen stellt, welche an einem messingenen Con-

Fig. 146.

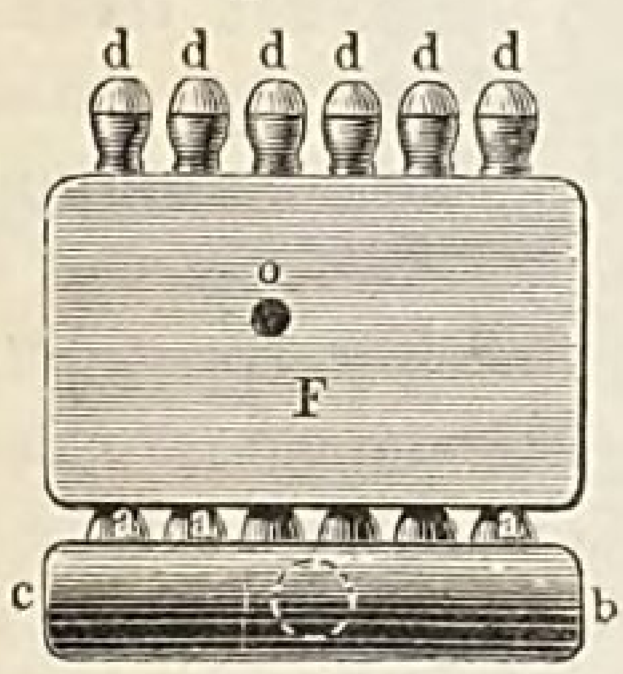
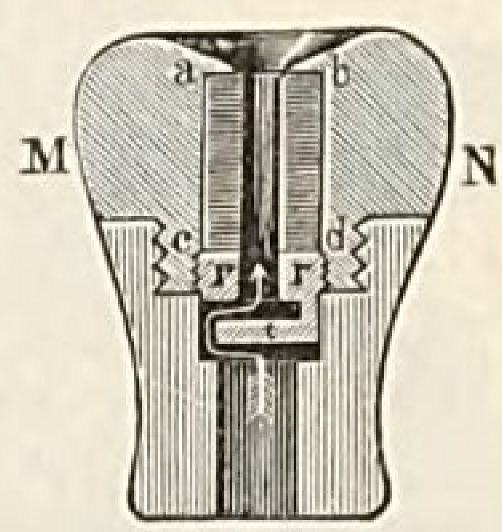


Fig. 147.



ductor befestigt sind, der mit dem Boden in leitender Verbindung steht. Dieser Conductor steht auf einem Glasfusse, so dass man ihn isoliren kann, um zu zeigen, dass der Dampf in der That die entgegengesetzte Elektricität des Kessels hat.

Mit dieser Hydroelektrisirmaschine lässt sich eine Batterie von 3,6 qm Oberfläche in der Zeit von 36 Secunden vollständig laden.

Dass die Elektricität hier wirklich durch die Reibung des Dampfes an den Wänden des Ausflusscanals und nicht etwa durch die Dampfbildung erzeugt wird, geht daraus hervor, dass augenblicklich alle Elektricität verschwindet, wenn man das Sicherheitsventil öffnet, obgleich die Dampfbildung ununterbrochen fortdauert.

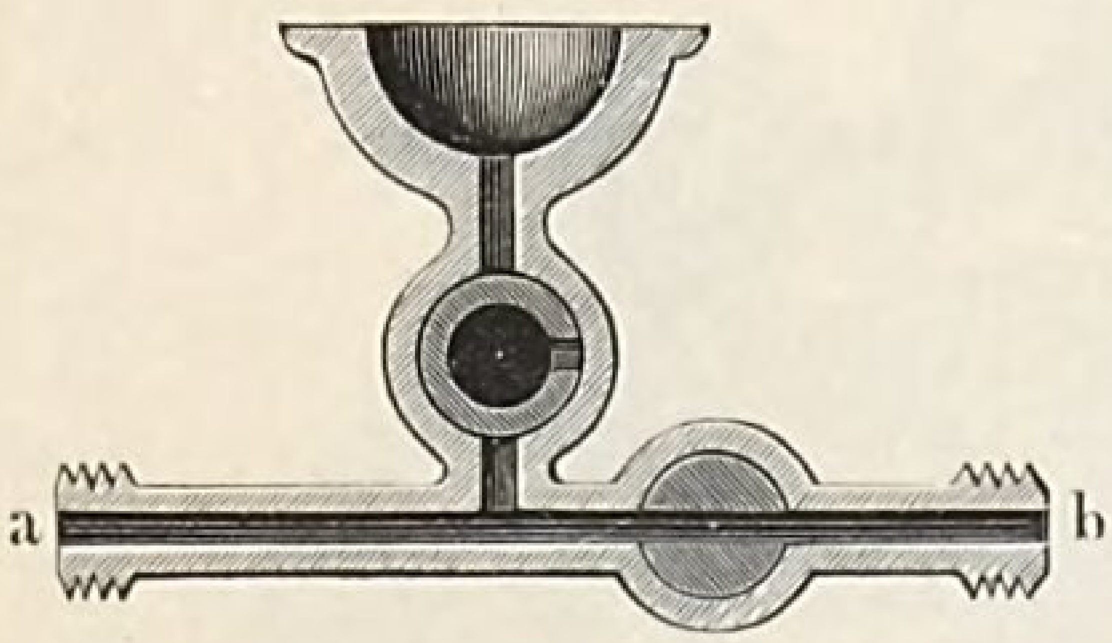
Zur Erzeugung der Elektricität ist es wesentlich, dass schon condensirte Wassertheilchen von dem ausströmenden Dampf mit durch die Ausströmungsröhren durchgetrieben werden; deshalb der Condensationsapparat *F*, Fig. 146. Wenn die Ausströmungsröhren lang genug sind, ist kein besonderer Abkühlungsapparat nöthig.

Wenn die Dampfmündung durch eine Holzröhre gebildet wird, wie es oben angegeben wurde, so ist der K e s s e l n e g a t i v, d e r D a m p f

positiv elektrisch; dasselbe ist der Fall bei Anwendung einer metallenen oder gläsernen Dampfmündung. Wendet man statt der hölzernen eine elfenbeinerne Röhre an, so zeigt der Kessel kaum Spuren einer Ladung.

Wenn man vor der Dampfmündung etwas Terpentinöl in die Ausströmungsröhre bringt, so wird der Kessel positiv und der Dampf negativ elektrisch. Um das Terpentinöl oder auch andere Flüssigkeiten bequem in die Ausströmungsröhre einbringen zu können, wendet man eine Vorrichtung an, welche durch Fig. 148 angedeutet ist. *ab* ist ein Stück des Ausströmungsrohres; aus demselben geht eine Röhre vertical in die Höhe, welche durch einen Hahn von eigenthümlicher Einrichtung geschlossen wird; er bildet nämlich eine Höhlung, welche nur nach einer Seite offen ist. Ueber diesem Hahn befindet sich eine trichterförmige Erweiterung, in welche die Flüssigkeit eingegossen wird. Wenn der Hahn steht, wie ihn die Zeichnung darstellt, so ist seine Höhlung weder mit dem Trichter, noch mit dem Rohr in Verbindung. Wird die Oeffnung des Hahnes nach oben gekehrt, so füllt sich seine Höhlung mit der Flüssigkeit aus dem Trichter; dreht man jetzt den Hahn um eine halbe Umdrehung, so muss nun die Flüssigkeit aus der Höhlung in das Rohr fallen.

Fig. 148.



Wenn durch Terpentinöl der Kessel positiv gemacht worden ist, so verliert sich dieser Zustand bald wieder, wenn nicht neues Terpentinöl eingebracht wird, und geht in den negativen über, sobald alles Terpentinöl weggerissen und verdampft ist. Fette Oele, wie Baumöl, bringen dieselbe Wirkung hervor, nur ist ihre Wirkung bleibender, weil sie nicht so flüchtig sind. Ein Holzfutter, durch welches einmal ein fettes Oel durchgeströmt ist, ist unbrauchbar, um den kräftigen negativen Zustand des Kessels wieder zu erzeugen, wie er entstehen würde, wenn der Dampf durch eine nicht fette Holzröhre ausströmte.

Bringt man durch den Hahn, Fig. 148, eine Salzlösung in die Ausströmungsröhre, so hört augenblicklich alle Elektricitätsentwickelung auf.

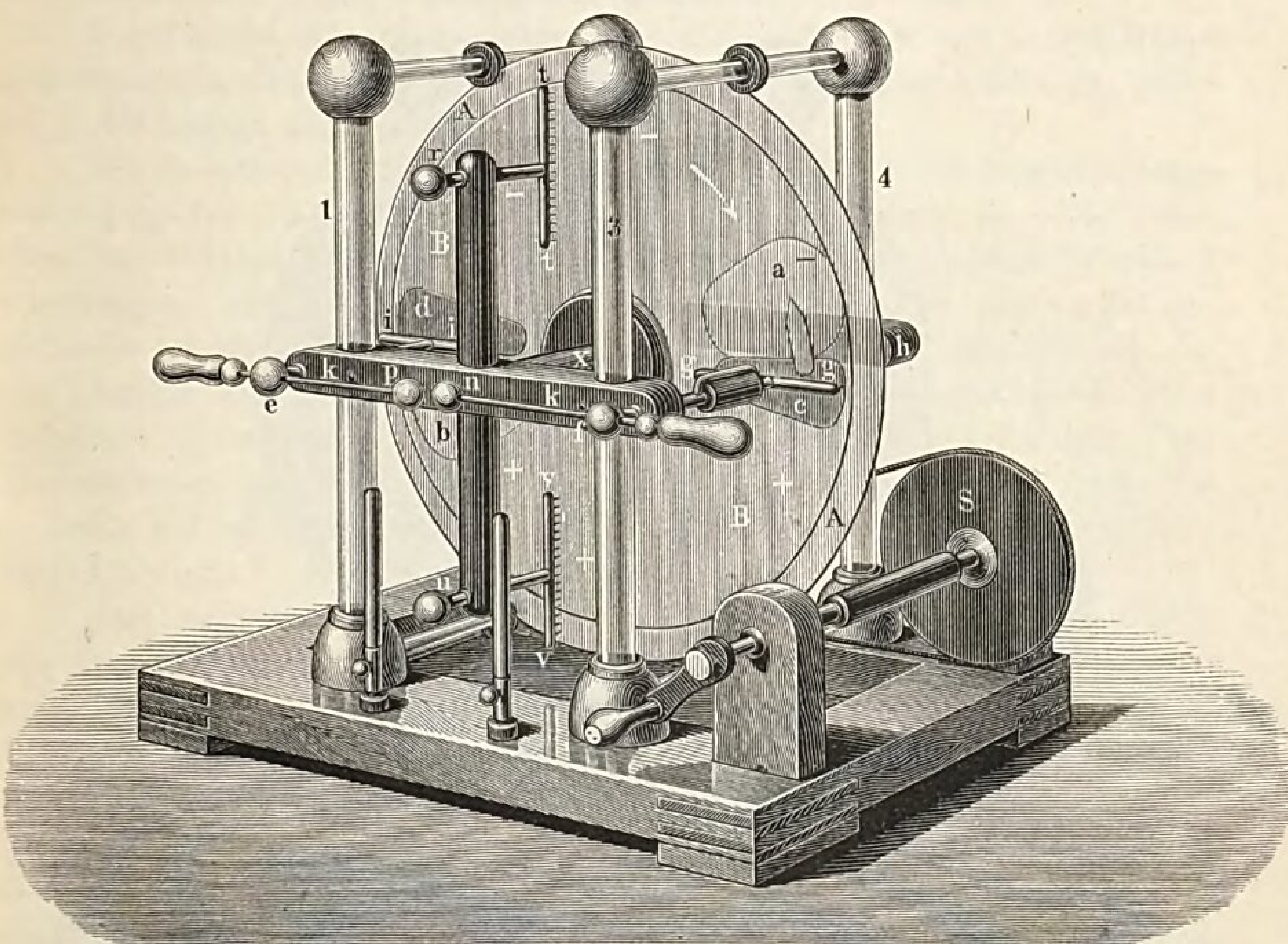
Alle diese Umstände beweisen, dass nur in der Reibung der ausströmenden Wasser- und Dampftheilchen an den Röhrenwänden und nicht in der Veränderung des Aggregatzustandes die Ursache der Elektricitätsentwickelung zu suchen sei.

Durch die Erfindung der Influenzmaschine ist die Dampfelektrisirmaschine entbehrlich geworden.

61 **Die Influenzmaschine, Maschinen von W. Holtz.** Während bei der gewöhnlichen Elektrisirmaschine fortwährend durch Rei-

bung neue Elektricität entwickelt wird, suchten Töpler*) und Holtz**) Apparate zu construiren, welche eine continuirliche Elektricitätsentwickelung durch Vertheilung ermöglichen, Apparate, bei welchen gleichsam der in getrennten Acten stattfindende Vorgang des Elektrophors in einen möglichst continuirlichen verwandelt wird. Dabei besteht aber ausserdem noch der Unterschied, dass bei den neuen Apparaten, welche jetzt allgemein als Influenzmaschinen bezeichnet werden, die vertheilende Elektricität nicht nur nicht verbraucht, sondern durch die Maschine selbst verstärkt wird, und dass in der Regel beide Influenzelektricitäten zur Wirkung kommen, während beim Elektrophor bekanntlich nur die angezogene benutzt zu werden pflegt.

Fig. 149.



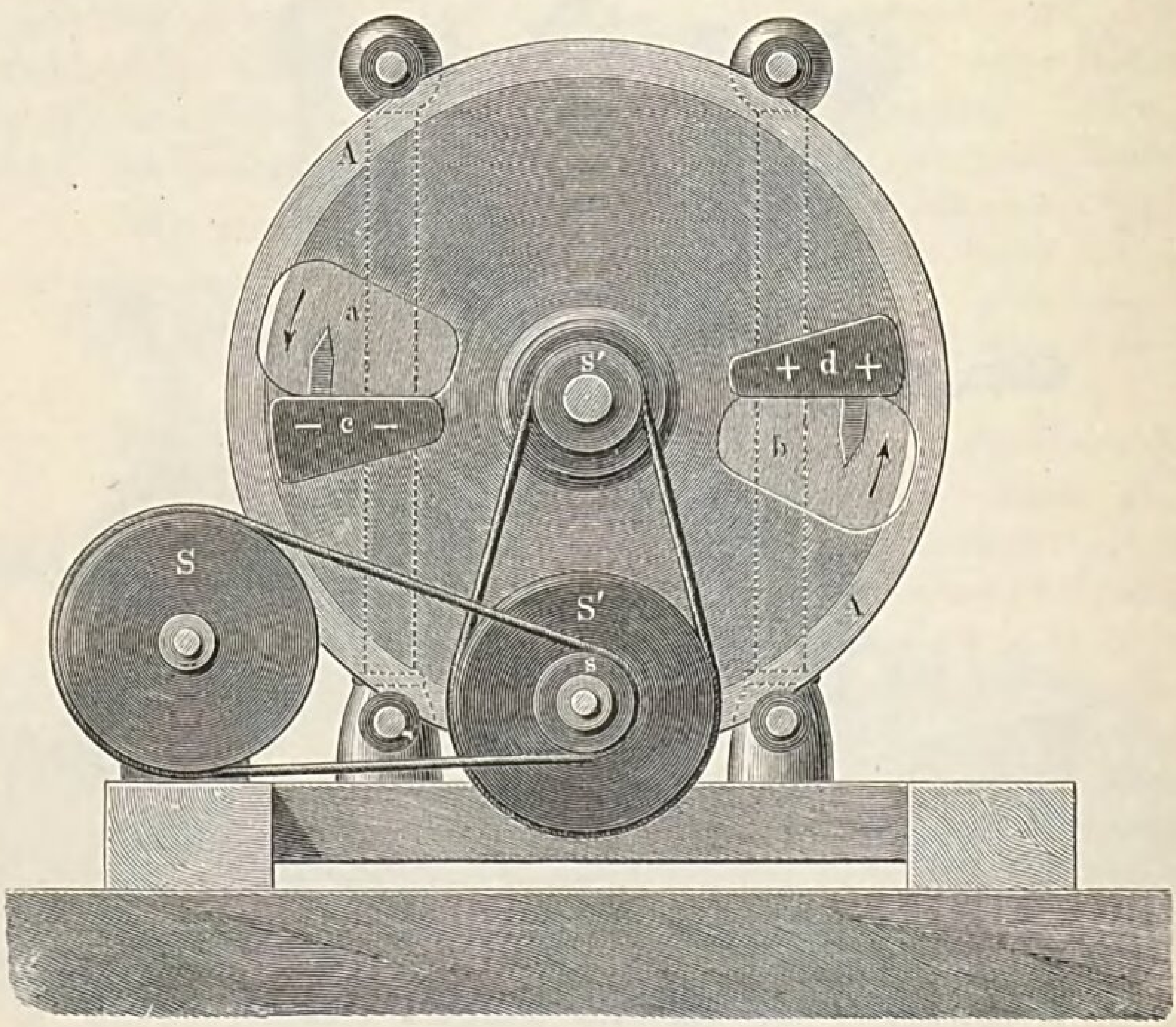
Obgleich die Apparate von Töpler und Holtz auf demselben Grundgedanken beruhen, so ist derselbe in ihren Constructionen doch in sehr verschiedener Form zum Ausdrucke gekommen, wie sich kaum anders erwarten lässt, da beide ganz unabhängig von einander arbeiteten. Die Maschinen von Holtz haben wegen ihrer kräftigen Wirkung und grossen Einfachheit zuerst allgemeine Aufnahme gefunden. Wir beschreiben in diesem Paragraphen zwei sehr gebräuchliche Formen derselben nach Ausführungen des Mechanikers Borchardt in Hannover.

*) Pogg. Ann. 1865, Bd. 125, S. 469.
**) Ibid. 1865, Bd. 126, S. 157, auch Bd. 127, S. 320.

Die ältere ist in Fig. 149 (a. v. S.) abgebildet. Auf Töpler'sche Constructionen werden wir im nächsten Paragraphen zurückkommen.

Auf dem hölzernen Fussgestell erheben sich vier Glassäulen 1, 2, 3 und 4 (die Glassäule 2 ist in unserer Figur verdeckt), von denen einerseits 1 und 2, andererseits 3 und 4 oben und unten durch horizontale Glasstäbe verbunden sind, die in den oberen und unteren Holzfassungen der verticalen Glassäulen stecken. Jeder dieser horizontalen Glasstäbe trägt ungefähr in seiner Mitte einen Ring von Kamm-Masse, welcher mittelst eines Schraubengewindes etwas verstellbar ist. Durch diese vier kleinen Ringe, von denen in unserer Figur nur die beiden oberen deutlich zu sehen sind, wird eine dünne Glasscheibe A in verticaler Stellung festgehalten.

Fig. 150.



In der Scheibe A, welche in Fig. 150 von der hinteren Seite dargestellt ist, sind diametral gegenüberstehend zwei Ausschnitte a und b angebracht; ausserdem aber ist aus der Mitte der Scheibe A ein kreisförmiges Stück ausgeschnitten, dessen Durchmesser etwas grösser ist, als der Durchmesser der Fassung der sogleich näher zu besprechenden Scheibe B.

Neben jeder der beiden Oeffnungen a und b (und zwar auf der für Fig. 149 hinteren Seite der Scheibe A) ist eine Belegung von Papier aufgeklebt, und zwar die Belegung c neben der Oeffnung a, d neben b. Von jeder dieser Papierbelegungen aus ragt ein zugespitzter Streifen

von Kartenpapier in den benachbarten Ausschnitt hinein. Die Scheibe A sammt den Belegungen und Kartenspitzen sind mit Schellackfirniss überzogen.

Dicht vor der feststehenden Scheibe A, Fig. 149, befindet sich die aus dünnem Spiegelglas verfertigte, gleichfalls mit Schellackfirniss überzogene Scheibe B, deren Durchmesser etwas kleiner ist als der von A und welche in ihrer Ebene in rasche Rotation versetzt werden kann. Die Rotationsaxe x ist aus Kamm-Masse verfertigt und an jedem Ende mit einem stählernen Zapfen versehen, von denen der vordere in einem Lager läuft, welches an dem aus Kamm-Masse gebildeten, zwischen den Glassäulen 1 und 3 befestigten Querbalken k angebracht ist, während sich das Lager für den hinteren Zapfen in gleicher Weise an einem von den Glassäulen 2 und 4 getragenen Querbalken h befindet.

Die Scheibe B wird zwischen zwei dicken Platten von Kamm-Masse gehalten, von denen die eine mit der Axe x fest zusammenhängt, während die andere abgeschraubt werden kann.

Die Rotation der Scheibe B wird durch eine Kurbel bewerkstelligt, welche an der Umdrehungsaxe der Scheibe S angebracht ist. Die Rotation der Scheibe S wird durch eine Schnur auf die kleinere Scheibe s übertragen, wie man aus Fig. 150 sieht. Auf der Axe von s sitzt die grössere Scheibe S', deren Bewegung wiederum durch eine Schnur auf die kleinere auf der Axe x sitzende Scheibe s' übertragen wird. Die Scheiben S, s, S' und s' sind aus Kamm-Masse verfertigt; ihre Durchmesser stehen in solchem Verhältnisse zu einander, dass die Scheibe B fünf Umdrehungen macht, während die Kurbel einmal umgedreht wird.

Auf der Vorderseite der rotirenden Scheibe B steht der Belegung c ein messingener Conductor gegenüber, welcher, in dem Querbalken k steckend, einerseits mit der Messingkugel f, andererseits mit dem in dreifacher Richtung verstellbaren Messingarme gg endigt, welcher gegen die Scheibe B hin mit Saugspitzen besetzt ist. Ein eben solcher Conductor ii steht der Belegung d in gleicher Weise gegenüber. Durch die Kugel f geht ein Messingstab, welcher einerseits mit einem isolirenden Handgriff, andererseits mit der Messingkugel n endigt. Ein gleicher mit der Messingkugel p endigender Messingstab steckt in der Kugel e. Die beiden Kugeln p und n, welche als Elektroden fungiren, können nach Belieben mehr von einander entfernt oder genähert werden.

Während e und ii in unmittelbarer metallischer Verbindung stehen, ist zwischen f und gg ein isolirendes Stück eingesetzt, und für gewöhnlich die metallische Verbindung zwischen f und g durch einen aufgesetzten Metallbogen vermittelt, welcher in später zu besprechenden Fällen weggenommen wird.

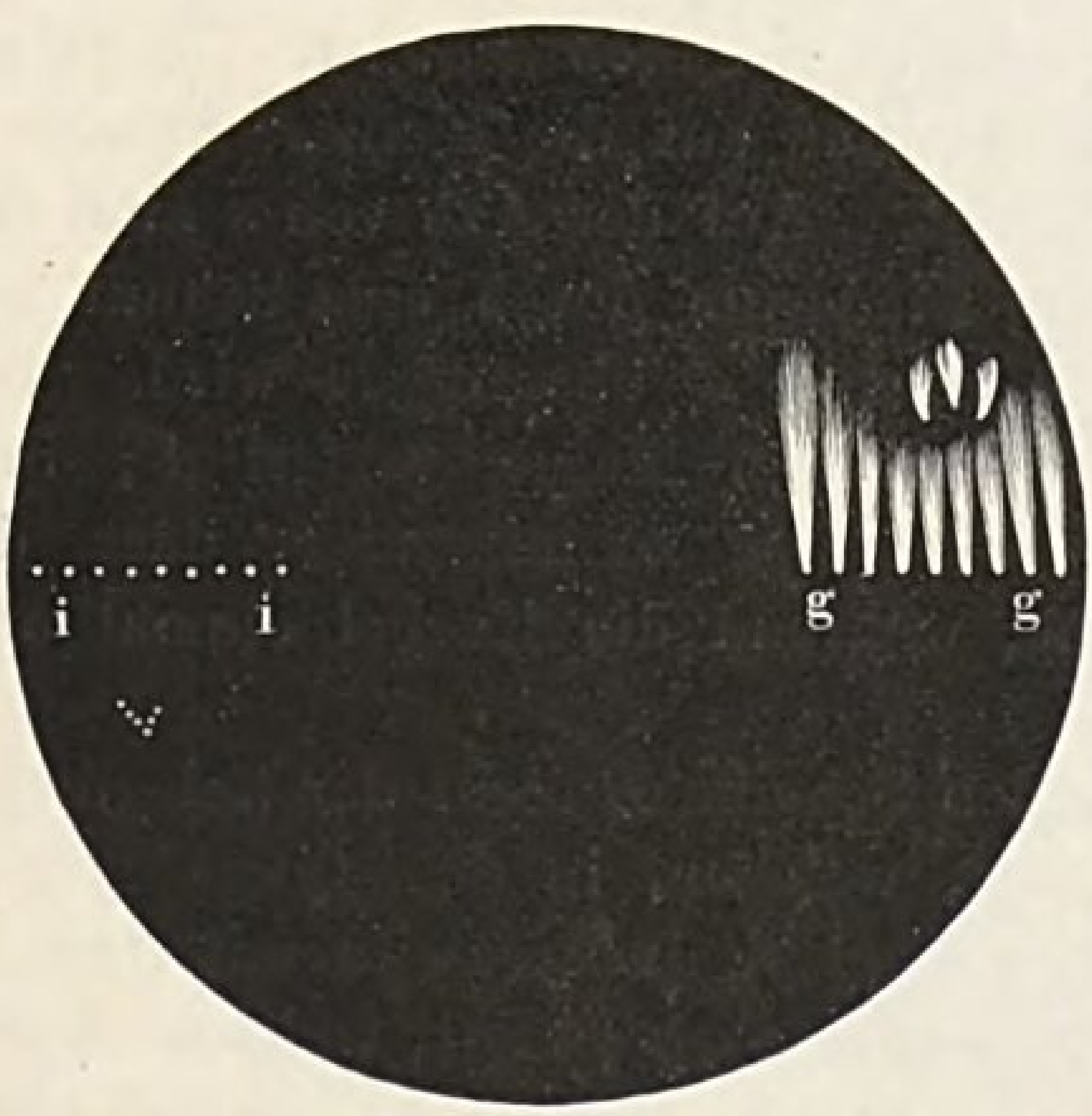
In der Mitte von k ist ein verticaler Stab von Kamm-Masse befestigt, welcher oben den Conductor tt, unten den Conductor vv trägt. Die Saugarme dieser beiden Conductoren seien nun zunächst von der

rotirenden Scheibe *B* zurückgezogen, wie dies auch in unserer Figur dargestellt ist.

Nach dieser Beschreibung des Apparates können wir nun zur Besprechung seiner Wirkungen übergehen. Um die Maschine in Thätigkeit zu setzen, wird eine mit Katzenfell geriebene dünne Platte von Kamm-Masse von der Rückseite der Fig. 149 an die Belegung *c* gehalten und diese dadurch mit negativer Elektricität geladen, während die Scheibe *B* (von vorn gesehen) rotirt wie der Zeiger einer Uhr. Dabei müssen anfangs die Elektroden *p* und *n* in Berührung sein.

Die negative Elektricität der Belegung *c* wirkt vertheilend auf den Conductor *fg*, die angezogene + *E* strömt also durch die Saugspitzen von *gg* auf die Platte *B* über, welche dadurch an dieser Stelle mit positiver Elektricität geladen wird. Diese Vertheilung würde aber bald ihr Ende erreicht haben, wenn die Glasscheibe *B* ruhig bliebe; da sie aber rotirt, so kommen stets neue Partien den Saugspitzen von *gg* gegenüber zu stehen, es kann also fortwährend positive Elektricität aus den fraglichen Spitzen auf die rotirende Scheibe übergehen, wie man im Dunkeln sehr schön sehen kann und wie es in Fig. 151 dargestellt ist, indem von den Spitzen aus Büschel positiver Elektricität an der rotirenden Scheibe hinaufströmen. In dem Maasse aber, in welchem die positive Elektricität von *gg* auf die Scheibe *B* überströmt, wird die abgestossene negative Elektricität von *gg* über *f*, *n*, *p* und *e* nach *ii* strömen. Von dem Conductor *ii* aber strömt die negative Elektricität auf die rotirende Scheibe über, wie man an den leuchtenden Pünktchen erkennt, welche an den Spitzen des Conductors *ii* auftreten.

Fig. 151.



Verfolgen wir nun den elektrischen Zustand der rotirenden Scheibe. Bei *gg* mit + *E* geladen, behält sie diese Ladung, welche theilweise durch die Nähe der festen Scheibe gebunden bleibt, auf der unteren Hälfte ihrer Bahn. Dem Ausschnitte *b* gegenüber wird die bis dahin auf *B* theilweise gebunden gewesene + *E* vollständig frei und kann vertheilend auf die Belegung *d* und die mit ihr verbundene Spitze von Kartenpapier einwirken. Negative Elektricität strömt von dieser Spitze auf die Scheibe *B* über und die Belegung *d* ladet sich in Folge dessen mit + *E*, welche das Ausströmen negativer Elektricität von *ii* auf die rotirende Scheibe noch mehr begünstigt. — Bei *ii* ladet sich also die rotirende Scheibe mit — *E*, welche sie auf der oberen Hälfte ihrer Bahn

behält und welche, dem Ausschnitte *a* gegenüber vollkommen frei werdend, auf die Belegung *c* vertheilend wirken kann, wodurch dann die negative Ladung von *c* noch verstärkt wird. Die Wirkung der rotirenden Scheibe auf die Belegung *c* wird durch die Büschel positiver Elektricität sichtbar, welche von der mit *c* verbundenen Spitze von Kartenpapier auf dieselbe übergehen (s. Fig. 151).

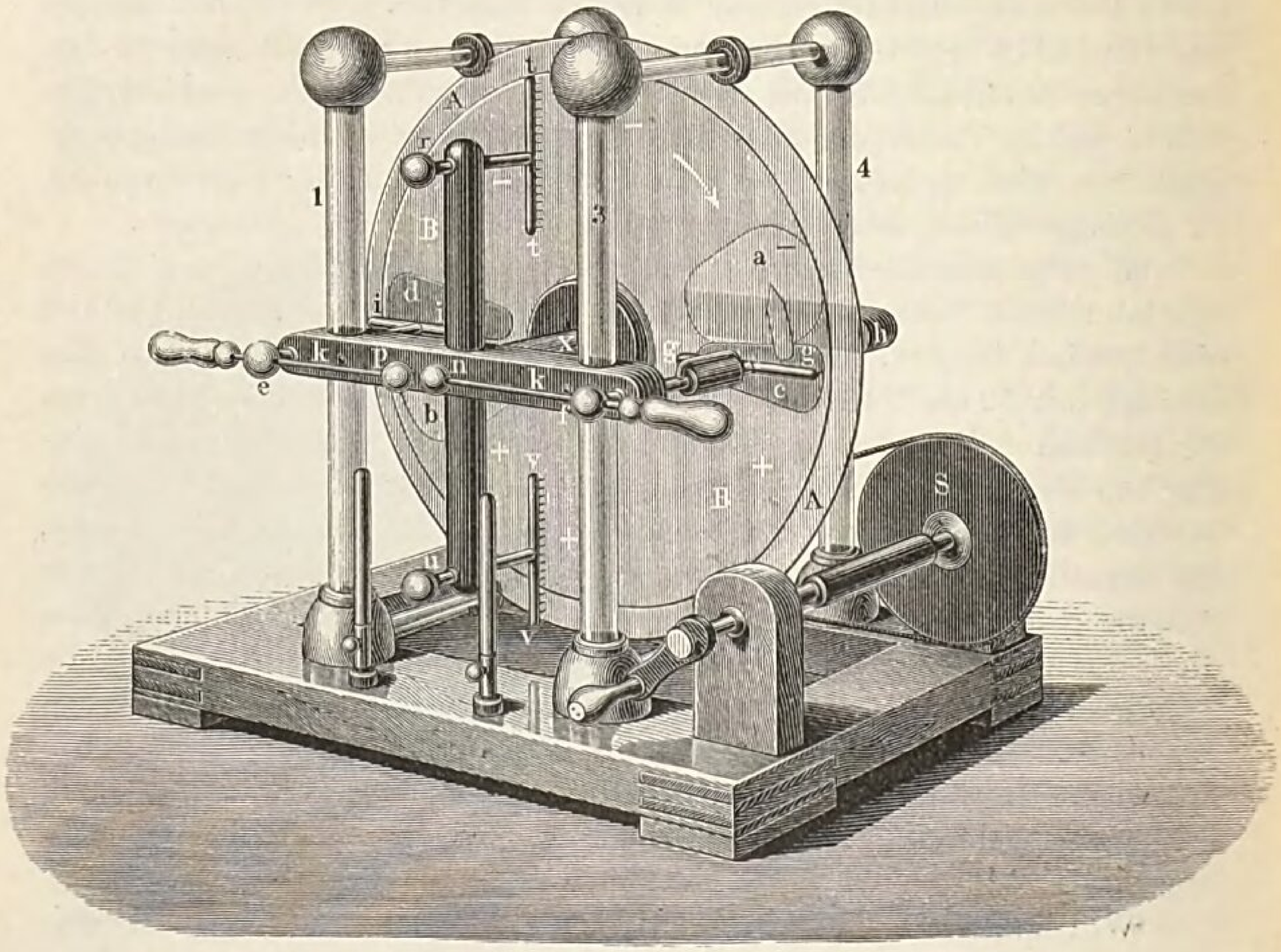
So wird denn die elektrische Ladung der Belegungen *c* und *d* durch die Rotationen der Scheibe *B* allmälig bis zu einer von den Isolationsverhältnissen abhängigen Grenze verstärkt, während in den Conductoren die positive Elektricität von *ii* über *e*, *p*, *n* und *f* nach *gg* strömt. Man erkennt leicht, dass in dem zwischen *ii* und *gg* circulirenden Strome beide Influenzelektricitäten zur Wirkung kommen. Der Conductor *gg* liefert nämlich nicht nur die von *c* abgestossene — *E*, sondern, da die obere Scheibenhälfte die bei *ii* (von *d*) angezogene — *E* herbeiführt, welche durch die an *c* befestigte Papierspitze nicht völlig ausgeglichen wird, so gelangt auch diese gleichzeitig an die Spitzen von *gg*. In analoger Weise setzt sich die von *ii* gelieferte + *E* zusammen.

Werden nun die Kugeln *p* und *n* von einander entfernt, so geht ein continuirlicher Funkenstrom zwischen denselben über, bis ihr Abstand eine gewisse Grenze, die Schlagweite, erreicht hat, die bei den Maschinen mit 30 cm Durchmesser der rotirenden Scheibe bis gegen 8 cm steigen kann. Werden die Kugeln *p* und *n* über die Schlagweite hinaus von einander entfernt, so kann die Elektricität nicht mehr in dem Systeme der Conductoren circuliren, die positive Elektricität kann bei *gg*, die negative bei *ii* nicht mehr in genügender Menge auf die rotirende Scheibe *B* überströmen, deren Ladung dann bald so weit abnimmt, dass die — *E* von der Belegung *c* und die + *E* von der Belegung *d* auf die Scheibe zurückströmt, was dann alsbald ein vollständiges Verschwinden der elektrischen Ladung des ganzen Apparates zur Folge hat. Um ihn wieder in Gang zu setzen, müssen die Kugeln *p* und *n* wieder in Berührung gebracht und die Belegung *c* wieder elektrisch gemacht werden.

Will man statt eines continuirlichen Funkenstromes einzelne kräftigere, in grösseren Intervallen auf einander folgende Funken erhalten, so bringt man die Maschine mit einem Ansammlungsapparate oder Condensator in Verbindung. Wir werden diesen Apparat, dessen gebräuchlichste Form die der Leydener Flasche ist, später näher beschreiben. Eine solche Leydener Flasche wird auf der rechten, eine gleiche wird auf der linken Seite der Maschine, Fig. 152 (a. f. S.), aufgestellt; die innere Belegung der ersteren wird mit dem Conductor *fg*, die innere Belegung der zweiten wird mit *ei* in leitende Verbindung gebracht, während ein Metalldraht die äusseren Belegungen beider Flaschen verbindet. Entfernt man nun, nachdem der Maschine ihre Ladung ertheilt worden ist, die Kugeln *p* und *n* von einander, so springen zwischen denselben kräftige und stark leuchtende Funken über.

Wenn die beiden Flaschen in der angegebenen Weise mit der Maschine verbunden sind, so findet eine Umkehrung der Polarität statt, so oft man die Kugeln über die Schlagweite von einander entfernt. Nach der ersten Umkehrung treten leuchtende Pünktchen an den Spitzen des Conductors *gg* auf der rechten Seite auf, während man am Conductor *ii* auf der linken Seite kleine positive Büschel beobachtet, welche von den Spitzen aus an der rotirenden Scheibe nach unten strömen. Bringt man nun, nachdem diese kleinen Büschel eben aufgetreten sind, die Kugeln *p* und *n* rasch wieder in Berührung, so flammen die nach unten gerichteten Büschel bei *ii* alsbald zu ihrer vollen Grösse auf. Es strömt nun die

Fig. 152.



positive Elektricität durch die Conductoren in der Richtung von *g* über *f*, *n*, *p* und *e* nach *i*, *n* ist also jetzt die positive, *p* ist die negative Elektrode.

Die Erklärung dieser Umkehrung bietet keine Schwierigkeit.

Um einen beliebigen Körper in den Schliessungsbogen der Maschine einzuschalten, dienen zwei Messinghülsen, welche auf isolirten, auf der vorderen Seite des Grundbrettes befindlichen Messingstäbchen stecken und auf diesen mit geringer Reibung verschiebbar sind. Die Zuleitungsdrähte für den einzuschaltenden Körper werden dann in den Fuss der Hülsenträger eingeschraubt. Durch Hinaufschieben der Messinghülsen bis zu den Messingstäben *ep* und *fn* kann man den Uebergang des Stromes mit passender Funkenstrecke vermitteln.

Um die Streifung des Lichtes in den später näher zu besprechenden Geissler'schen Röhren zu zeigen, muss ausser der Röhre noch eine feuchte Schnur in den Schliessungsbogen eingeschaltet werden.

Da die Influenzmaschine eine grosse Quantität von Elektricität liefert, so können selbst grosse Flaschen und Batterien durch Verbindung ihrer Belegungen mit den Elektroden *e p* und *f n* in sehr kurzer Zeit geladen werden.

Für den Gebrauch unseres Apparates ist es höchst unangenehm, dass sich die elektrische Ladung desselben so rasch verliert, wenn man die Kugeln *n* und *p* über die Schlagweite hinaus von einander entfernt. Diesen Uebelstand kann man durch die überzähligen Conductoren *rtt* und *uvv* beseitigen, welche bisher ausser Wirksamkeit blieben, weil die Saugarme *tt* und *vv* zu weit von der rotirenden Scheibe *B* entfernt waren. Wird der Arm *tt* mit seinen Spitzen bis dicht vor die Scheibe *B* vorgeschoben, und dann, wenn der Apparat in Gang gesetzt ist, der Conductor *rtt* durch einen Messingbügel mit *fgg* in leitende Verbindung gesetzt, so verliert sich nun die elektrische Ladung des Apparates nicht mehr, wenn man auch die Kugeln *n* und *p* über die Schlagweite hinaus von einander entfernt. Die volle Thätigkeit des Apparates tritt sogleich wieder ein, wenn man die Kugeln *n* und *p*, nachdem sie eine Zeit lang weit von einander entfernt waren, wieder nähert. Die Wirksamkeit des überzähligen Conductors ist leicht zu erklären. Wenn der supplementäre Conductor fehlt und die Kugeln *p* und *n* über die Schlagweite von einander entfernt sind, so ist der Weg unterbrochen, auf welchem die positive Elektricität von *ii* über *gg*, die negative aber von *gg* über *ii* nach der rotirenden Scheibe strömen kann, die rotirende Scheibe kann sich also bei *gg* nicht mehr genügend mit positiver, bei *ii* nicht mehr genügend mit negativer Elektricität laden und die Maschine muss alsbald aufhören zu functioniren. Wenn aber der supplementäre Conductor *rtt* in der angegebenen Weise angebracht ist, so kann bei allzu grosser Entfernung der Kugeln *p* und *n* die bei *gg* abgestossene negative Elektricität von *gg* nach *rtt* und bei *tt* auf die rotirende Scheibe strömen, während die positive auf dem entgegengesetzten Wege von *tt* nach *gg* gelangt. Damit die angegebene Wirkung sicher eintritt, ist es zweckmässig, die dem Conductor *tt* gegenüberliegende Stelle auf der Rückseite der festen Scheibe *A*, wenn man die Maschine in Thätigkeit setzt, auf kurze Zeit ableitend zu berühren.

Dass sich die Sache wirklich so verhält, davon kann man sich leicht überzeugen, wenn man im Dunkeln experimentirt. Wenn die Kugeln *p* und *n* in Berührung sind, so zeigen sich an den Spitzen von *ii* die schon erwähnten negativen Lichtpünktchen, bei *tt* sowohl als auch bei *gg* aber sieht man positive Lichtbüschel, Fig. 153, welche jedoch weit kleiner sind als die, welche man in dem Fig. 151 dargestellten Falle bei *gg* beobachtet. Sobald man aber die Kugeln *p* und *n* über die Schlagweite entfernt, verschwinden die Lichtpünktchen bei *ii* fast ganz. Die Büschel

bei *tt* verwandeln sich in negative Pünktchen, während die Lichtbüschel bei *gg* bedeutend an Grösse zunehmen. Ganz so wie *tt* kann auch der Conductor *vv* in Verbindung mit *eii* benutzt werden.

Die feste Scheibe *A*, welche in den Apparat Fig. 152 eingesetzt ist, war mit zwei Belegungen *c* und *d* und mit zwei Ausschnitten *a* und *b*, oder wie es Holtz nennt, mit zwei Elementen versehen. Man kann dieselbe aber auch mit einer anderen, mit vier Elementen versehenen vertauschen, wie sie in Fig. 154 dargestellt ist. Den Belegungen *c* und *d* stehen die Conductoren *gg* und *ii*, den Belegungen *c'* und *d'* stehen die Conductoren *vv* und *tt* gegenüber. Wenn die Belegung *c* mit — *E* geladen ist, so wird auch *d* negativ elektrisch, während *c'* und *d'* sich mit positiver Elektricität laden. Aus den Spitzen von *gg* und *ii* wird also positive, aus den Spitzen von *vv* und *tt* wird negative Elektricität auf die rotirende Scheibe strömen, die von *c* und *d* ab-

Fig. 153.

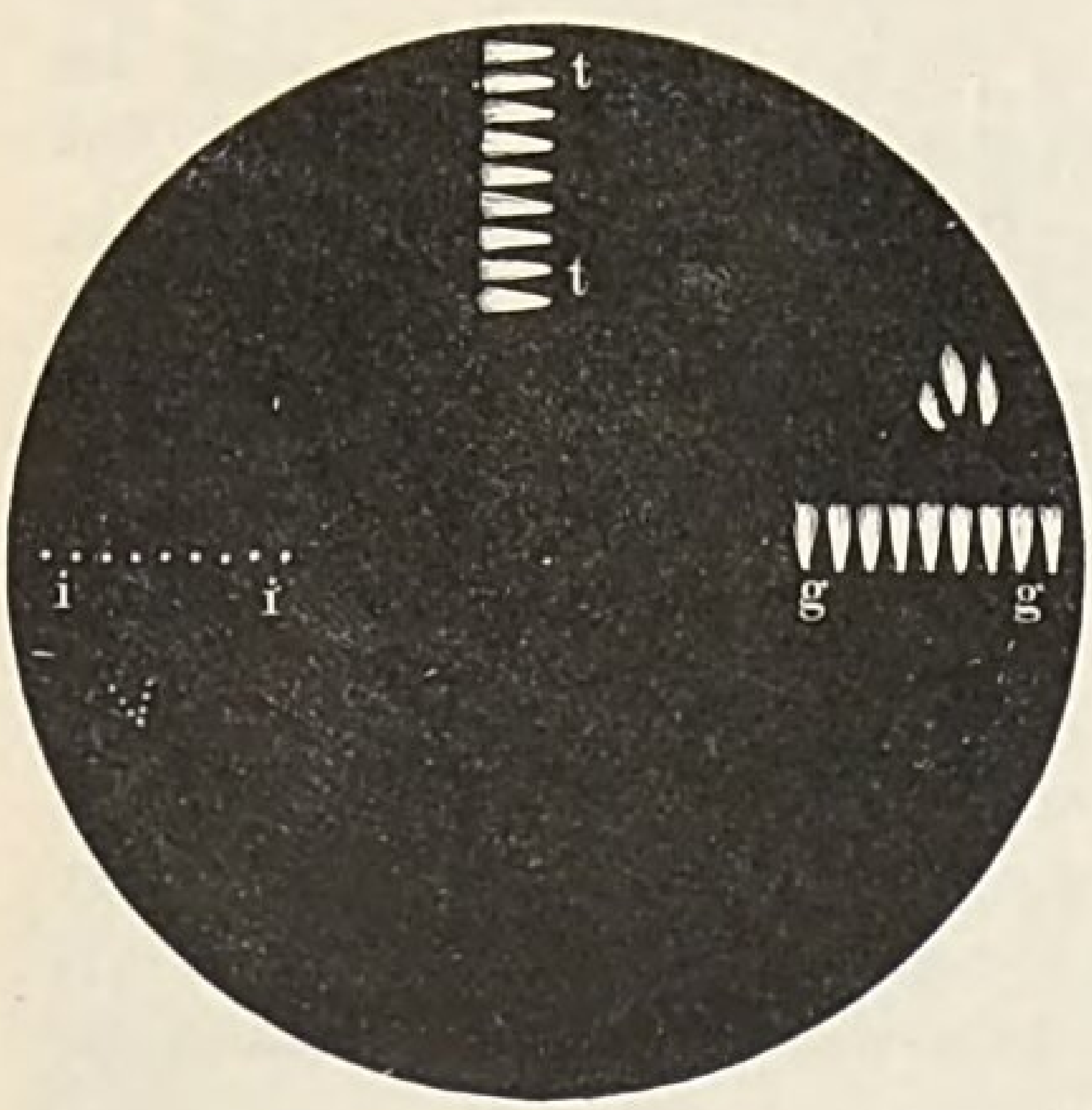
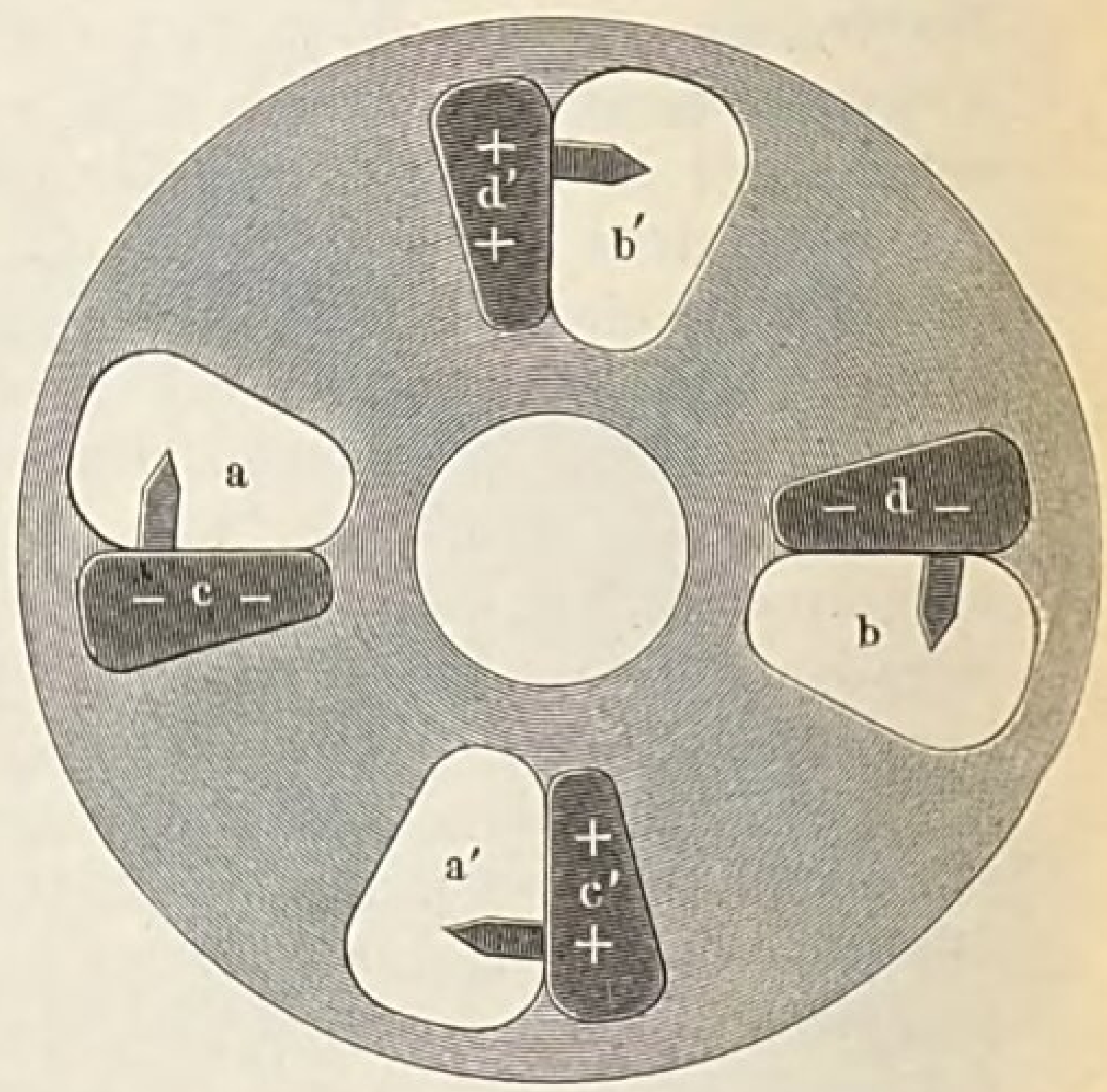


Fig. 154.



strömende negative Elektricität muss also in der einen, die von *c'* und *d'* abströmende positive Elektricität muss in der anderen Elektrode gesammelt werden.

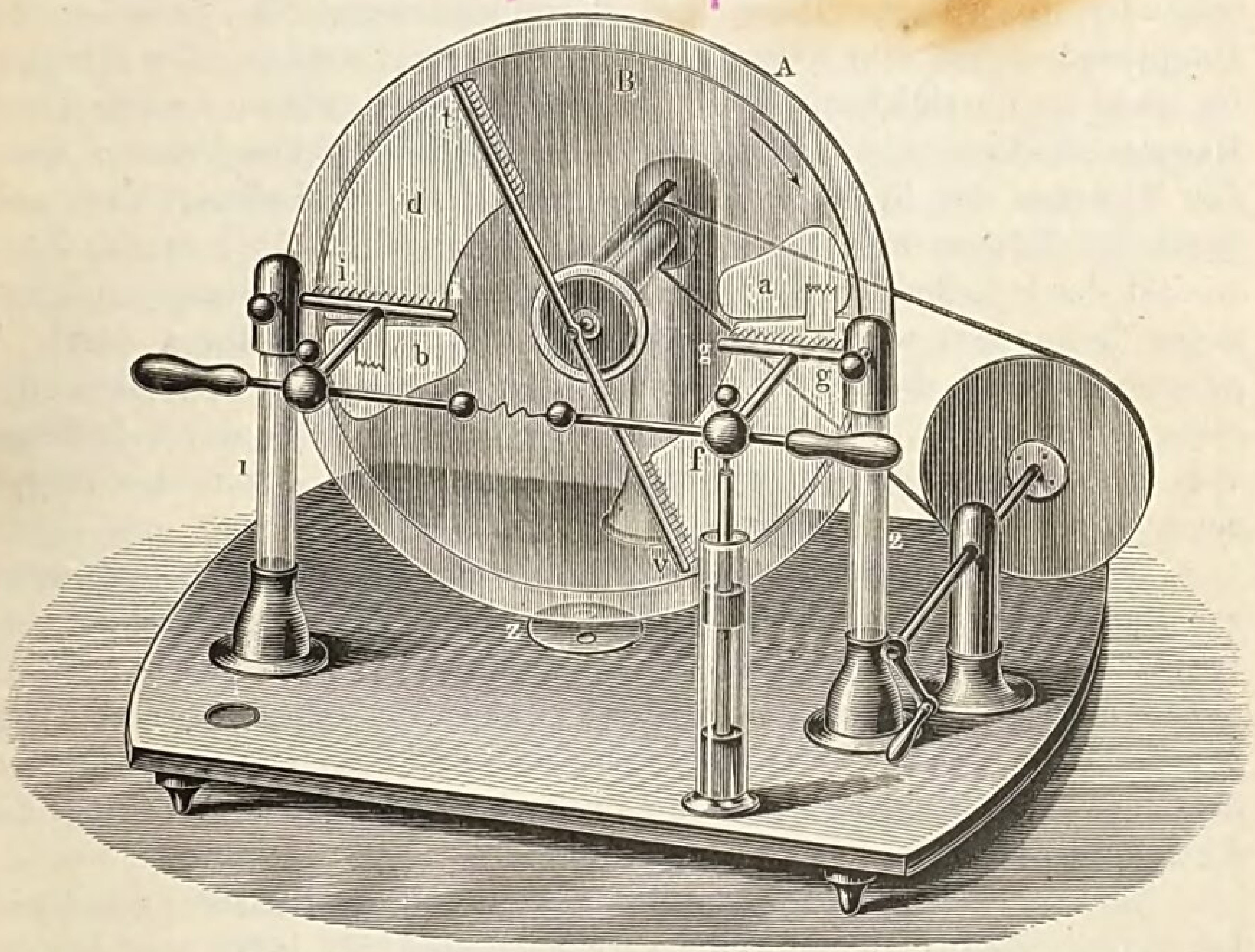
Dies geschieht in folgender Weise; der Messingbügel, welcher *gg* mit *f* verbindet, wird entfernt und alsdann *uvv* mit *f* und *rtt* durch einen Messingbügel metallisch verbunden; dadurch wird offenbar *n* die positive Elektrode, in welcher die von *tt* und *vv* abströmende positive Elektricität vereinigt wird. Ferner aber wird auch *gg* mit *ii* metallisch verbunden, wodurch dann *p* zur negativen Elektrode wird.

Wenn die Scheibe mit vier Elementen eingesetzt ist, so liefert der Apparat eine grössere Quantität von Elektricität, während die Schlagweite geringer ist als bei Anwendung der festen Scheibe von zwei Elementen.

Eine zweite Form der Holtz'schen Maschine ist in Fig. 155 abgebildet*). Dieselbe ist noch einfacher und übersichtlicher als die vorige und für Schulzwecke besonders zu empfehlen; sie ist zugleich wirksamer und daher jetzt wohl am meisten im Gebrauch.

Bei dieser Maschine rotirt die bewegliche Scheibe *B* vermittelst einer mit Schnurlauf versehenen Büchse um einen einseitig, und zwar von hinten befestigten Zapfen, so dass die vordere Seite der Scheibe bequem zugänglich ist. Die feste Scheibe *A* ruht auf einer kleinen Ebonitplatte *z* mit Nuthe, während ein von hinten in ihre mittlere Oeffnung greifender Ebonithaken sie vor dem Umfallen schützt. Gegen zwei peripherische Stellen wirken nebenbei zwei Ebonitscheiben, welche in

Fig. 155.



den Köpfen seitlich gestellter Isolatoren 1 und 2 befindlich sind. Die letzteren dienen gleichzeitig zur Befestigung der Hauptconductoren *ggf* und *iie*, durch deren nach vorn gerichteten Arme die Entladungsstangen gehen. Gedachte Isolatoren sind drehbar, damit man die Einsauger abstellen und so die Glasscheiben leicht aus- und einsetzen kann. Als Condensatoren fungiren zwei Leydener Flaschen von besonderer Form und grösserer Glasdicke, deren äussere Belegungen durch einen unterhalb der Maschine verlaufenden Leiter verbunden sind. Eine dieser Flaschen ist rechts in Verbindung mit dem Hauptconductor *fgg* abgebildet. Die Papierbelegungen *c* und *d* dieser Maschine sind bedeu-

*) Pogg. Ann. Bd. 136, S. 171, und Ergbd. 178, S. 407.

tend grösser; sie überdecken längs des Scheibenrandes von den Hauptconductoren aus einen Winkelraum von etwa je 60 Grad. In die Ausschnitte *a* und *b* der festen Scheibe ragen am Ende gezahnte Fortsätze der Papierbelegungen, ähnlich den Spitzen der vorher beschriebenen Maschine. Den abgewandten Enden dieser Belegungen gegenüber befindet sich vor der beweglichen Scheibe der sogenannte diametrale oder Nebenconductor*) *dv*, eine gerade Messingstange mit Spitzenkämmen. Gehalten wird dieser Conductor durch einen conischen Stift, welcher in eine Vertiefung des festen centralen Zapfens hineinpasst.

Der diametrale Conductor versieht in wirksamster Weise das Geschäft der früher beschriebenen überzähligen Conductoren, d. h. er verhindert das plötzliche Versagen der Maschine oder den bisweilen auftretenden freiwilligen Polwechsel derselben, wenn die Entlader der Hauptconductoren sehr weit von einander entfernt werden. Der Hergang ist leicht zu überblicken. Geht der regelmässige Strom zwischen den Hauptconductoren über, so geht die bewegliche Scheibe geladen unter den Kämmen des Nebenconductors hindurch; diese Ladung wird aber durch die Kämme nicht beeinträchtigt, eher noch erhöht, da die Elektricität der Scheibe durch die rückwärts befindlichen Belegungen angezogen (gebunden) wird. Treten aber die Hauptconductoren durch zu grossen Abstand der Entladerarme ausser Function, so wird eben dieselbe Function, d. h. die Ladung der beweglichen Scheibe durch Influenz, vom Nebenconductor besorgt; in ihm circulirt nun der in den Hauptconductoren erloschene Strom.

Die beschriebene Maschine giebt mit den zugehörigen Condensatoren Funken von reichlich der Länge des halben Scheibendurchmessers. Holtz hat auch eine Doppelmaschine construirt**), welche im Wesentlichen eine symmetrische Verbindung zweier einfacher Maschinen der vorher beschriebenen Art ist, sich aber dadurch auszeichnet, dass sie bei derselben Scheibengrösse fast die dreifache quantitative Wirkung der Einzelmaschine giebt.

Auch hat derselbe Physiker eine eigenthümliche Maschine construirt bei welcher die Belegungen völlig vermieden sind***), indem zwei bewegliche Glasscheiben dicht vor einander in entgegengesetztem Sinne zwischen passend gestellten Spitzenkämmen rotiren. Bezüglich der Beschreibung dieser in theoretischer Hinsicht interessanten Maschine müssen wir auf die Originalabhandlungen verweisen.

Die Erklärung der Vorgänge an der Holtz'schen Maschine gestaltet sich etwas verwickelter, wenn man alle Einzelheiten berücksichtigen will. So ist z. B., strenge genommen, zu beachten, dass die elektrisirten Belegungen nicht nur durch die bewegliche Scheibe hindurch, sondern auch

*) Zuerst von Poggendorff eingeführt.

**) Pogg. Ann. 1867, Ergbd. S. 413 und 427.

***) Pogg. Ann. Bd. 130, S. 128, und Bd. 136, S. 173; ferner Wiedemann, „Lehre von der Elektricität“, Bd. II, S. 211, 1883.

auf deren Masse selbst influenzirend (dielektrisch polarisirend) wirken. Der hierdurch und durch die Spitzenwirkung bedingte Zustand der Scheibe (die Riess'sche Doppelinfluenz) ist aber kein nöthiges Erforderniss für die Stromerzeugung, wiewohl er den Process begünstigt. Es lassen sich auch Influenzmaschinen construiren, bei denen der erwähnte Zustand keine Rolle spielt.

Duplicatoren, Geschichtliches, Töpler's Influenzmaschinen mit sogenannter Selbsterregung. 62 Eine bemerkenswerthe Eigenthümlichkeit an den vorher beschriebenen Maschinen ist der Process, durch welchen die anfängliche Elektrisirung der feststehenden Belegungen verstärkt und bei regelmässigem Gange der Maschine auf einem Maximum erhalten wird. Dieser Verstärkungs- oder Multiplicationsprocess war auch bei der am Anfange des vorigen Paragraphen erwähnten Maschine von Töpler zur Anwendung gebracht worden; mit dem Unterschiede jedoch, dass die Verstärkung der ursprünglichen Elektrisirung nicht mit Hülfe eines beweglichen Isolators und Spitzenwirkung, sondern durch Influenzirung beweglicher Metallflächen, welche an geeigneten Contactvorrichtungen vorübergingen, geschah.

Die Ausführbarkeit derartiger Multiplicationsprocesse war schon früher bekannt. Schon die im vorigen Jahrhundert erfundenen sogenannten Duplicatoren von Bennet, Nicholson und Bohnenberger*) waren Instrumente, welche den Zweck hatten, äusserst kleine Elektricitätsmengen durch Influenz zu vervielfältigen und dadurch elektroskopisch wahrnehmbar zu machen, dienten also nur zu Beobachtungszwecken. Aber auch schon zu dem ausdrücklichen Zwecke der Elektrisirung von Körpern ist dasselbe Duplicatorprincip von Belli (1831**) und Varley (1860***) angewendet worden, ja, des Letzteren Apparat hat sogar eine gewisse, freilich nur äusserliche Aehnlichkeit mit der Holtz'schen Maschine. Da Varley's Instrument sehr geeignet ist, den in Rede stehenden Multiplicationsprocess noch etwas näher zu erläutern, so geben wir ein Schema desselben in dem oberen, nicht punktirten Theile der Fig. 156 (a. f. S.), die punktirten Theile denke man sich also aus der Figur entfernt.

Die schwarz gezeichneten Bögen *A* und *B* bedeuten zwei feststehende, völlig isolirte Leiter, die Vertheiler (Inductoren nach englischer Benennung), in deren Nähe die ebenfalls schwarz gezeichneten

*) Siehe Marbach, „Physikalisches Lexikon" Bd. II, S. 565.

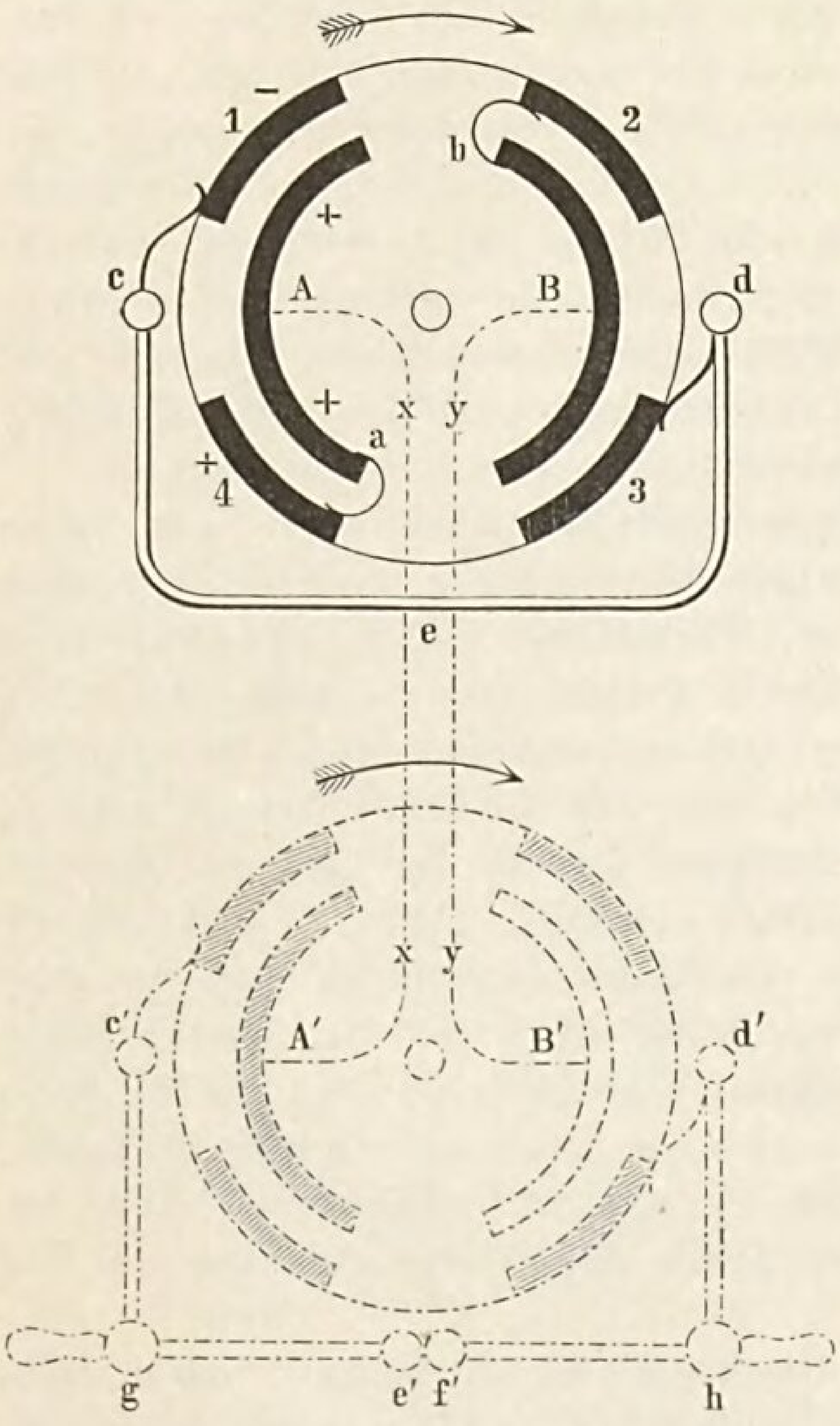
**) Vergl. Wiedemann, „Die Lehre von der Elektricität", 1883, Bd. II, S. 196.

***) Aus den Angaben der englischen Physiker geht hervor, dass der Varley'sche Apparat ursprünglich nur in einer Patentspecification, nicht in einer wissenschaftlichen Zeitschrift beschrieben war und daher erst später bekannt wurde. Eine Abbildung ist in dem Werke „Elektricität und Magnetismus" von Fleeming Jenkin (deutsch von Exner) zu finden.

und von einander isolirten beweglichen Leiter 1, 2, 3 und 4, die sogenannten Uebertrager*), im Sinne des Pfeiles vorbeirotiren; *a*, *b*, *c* und *d* seien Contactfedern, welche in gewissen Momenten die aus der Figur ersichtliche Verbindung herstellen. Die Contactfedern *c* und *d* waren bei Varley's Apparat stets durch einen festen Verbindungsbogen *ced*, der ausserdem zur Erde abgeleitet war, metallisch verbunden.

Man sieht sofort, dass, wenn etwa der Vertheiler *A* ein kleines Quantum $+ E$ erhält, dann der Uebertrager 1 durch Influenz mit $- E$ geladen in die Stellung 2 wandert, hier $-E$ an *B* abgiebt, um wiederum durch Influenz bei 3 mit $+ E$ geladen, nach 4 zu kommen, woselbst er die schon vorhandene $+ E$ auf *A* verstärkt etc. Man kann sich durch eine einfache mathematische Betrachtung von dem Anwachsen der Ladungen auf *A* und *B* Rechnung geben, ja man kann einsehen, dass der Multiplicationsprocess immer von statten gehen muss, selbst wenn *A* und *B* gleichnamig geladen sind, wenn nur von vornherein eine Differenz der Ladungen auf ihnen besteht**).

Fig. 156.



Gesetzt, es sei in der gezeichneten Stellung der Uebertrager irgend ein ungleicher elektrischer Zustand auf *A* und *B* vorhanden, den wir durch die beiden Potentiale *V* (auf *A*) und *V'* (auf *B*) bezeichnen. Bei derselben relativen Lage der Systemtheile sind die vorhandenen Elektricitätsmengen den Potentialen proportional. Auf den metallisch verbundenen Theilen *A* und 4 seien die Elektricitätsmengen durch die Producte

*) An Varley's Apparat befanden sich in Wirklichkeit 6 Uebertrager anstatt 4, auch besassen dieselben leitende Fortsätze, welche an Contactvorrichtungen anstiessen; beides ist für die obige Betrachtung nicht wesentlich.

**) Obige Entwickelung schliesst sich an eine Darstellung von Töpler in den Sitz. Ber. der Berl. Akad. vom 11. Dec. 1879. Vergl. auch Maxwell, „Treatise on El. and Magn.", Bd. I.

$C.V$ und $\alpha.V$ ausgedrückt, wobei C die Capacität von A, jedoch α diejenige von 4 bezeichnet*). Dem Potential V proportional ist auch die auf dem Uebertrager 1 durch Influenz erregte Ladung entgegengesetzter Art; wir wollen sie mit $-\beta.V$ bezeichnen. Ganz in derselben Weise kann man auf der rechten Seite der Maschine, woselbst wir dieselben relativen Lagenverhältnisse voraussetzen, die vorhandenen Elektricitätsmengen mit dem Potential V' ausdrücken. Man hat also auf den verbundenen Theilen:

A mit 4 die Elektricitätsmenge $(C+\alpha)\,V$
B „ 2 „ „ $(C+\alpha)\,V'$.

Nach je einer Viertelrotation rücken die Uebertrager in der Reihe um je eine Ziffer vor; sie wechseln ihre Stellung, wobei jedesmal wieder dieselbe Anordnung von Leiterflächen zum Vorschein kommt. Daher kann man die nach der ersten Vierteldrehung auf A nebst dem damit verbundenen Uebertrager (bei 4) vorhandene Ladung wiederum mit $(C+\alpha)\,V_1$ ausdrücken, wobei V_1 das nunmehrige Potential bedeutet. Diese Elektricitätsmenge entstand aber, indem von dem vorherigen Ladungszustande die Menge $C.V$ auf A übrig blieb und dazu die von der Stelle 3 nach 4 transportirte Menge $-\beta V'$ hinzukam. Beide ordnen sich neuerdings an. Auf der anderen Seite des Apparates entsteht durch die analogen Vorgänge ebenfalls ein neues Potential V_1'. Das Gesagte stellt sich in folgenden beiden Gleichungen dar:

$$(C+\alpha)\,V_1 = C\,V - \beta\,V'$$
$$(C+\alpha)\,V_1' = C\,V' - \beta\,V.$$

Man kann also die neuen Potentiale V_1 und V_1' aus den alten V und V' berechnen. Die Gleichungen geben durch Subtraction und Addition:

$$V_1 - V_1' = (V - V')\,\frac{C+\beta}{C+\alpha}$$

und

$$V_1 + V_1' = (V + V')\,\frac{C-\beta}{C+\alpha}.$$

Die constanten Grössen C, α und β hängen von dem Abstande und der Grösse der Leiterflächen ab. Wenn der Abstand der Uebertrager von den Vertheilern nicht gross ist, so ist jedenfalls β grösser als α, denn $V.\beta$ und $V'.\beta$ bedeuten die bei 1 und 3 angezogenen Influenzelektricitäten, welche rückwärts anziehend auf die Elektricität der Vertheiler wirken, so dass auf den mit ihnen verbundenen Uebertragern 4 und 2 nur ein kleiner Antheil ($V.\alpha$ und $V'.\alpha$) übrig bleibt. Daher ist

$$\frac{C+\beta}{C+\alpha}$$

*) Siehe die zweite Anmerkung auf S. 138 oder die Erörterungen des §. 68.

ein unechter,

$$\frac{C - \beta}{C + \alpha}$$

ein echter Bruch.

Die obigen Gleichungen gelten für jede Vierteldrehung. Daher ist, wenn V_z und V'_z die Potentiale nach z Vierteldrehungen bedeuten:

$$1)\quad V_z - V'_z = (V - V')\left(\frac{C + \beta}{C + \alpha}\right)^z$$

$$2)\quad V_z + V'_z = (V + V')\left(\frac{C - \beta}{C + \alpha}\right)^z$$

Die Differenz der Potentiale auf den Vertheilern wächst also nach einer geometrischen Reihe, die Summe nimmt nach einer solchen ab. Die nach z Stellungswechseln auf A und B vorhandenen Elektricitätsmengen sind das C-fache von V_z und V'_z und aus den Gleichungen leicht zu berechnen.

$$3)\quad C V_z = \frac{V - V'}{2}\left(\frac{C + \beta}{C + \alpha}\right)^z + \frac{V + V'}{2}\left(\frac{C - \beta}{C + \alpha}\right)^z$$

$$4)\quad C V'_z = -\frac{V - V'}{2}\left(\frac{C + \beta}{C + \alpha}\right)^z + \frac{V + V'}{2}\left(\frac{C - \beta}{C + \alpha}\right)^z.$$

Je grösser z wird, desto kleiner werden in beiden Gleichungen die letzten Glieder rechter Hand. Der Process hat also die Eigenthümlichkeit, dass, wie immer die anfängliche Erregung gedacht werde, die Elektrisirung der Leiter A und B bei fortgesetzter Drehung entgegengesetzt gleichen Werthen zustrebt.

In Wirklichkeit findet der Multiplicationsprocess selbstverständlich eine Grenze in den unvermeidlichen Elektricitätsverlusten; jedoch multiplicirt der Varley'sche Apparat die allerschwächsten Ladungen so stark, dass aus A und B alsbald Funken gezogen werden können. Man kann eine Leydener Flasche damit laden, indem man ihre Belegungen mit A und B verbindet; wird B zur Erde abgeleitet, so muss der Verbindungsbogen ced isolirt werden, damit A Funken giebt. Später hat W. Thomson ein kleines Maschinchen ganz derselben Art unter dem Namen Replenisher angegeben *) und bei seinem Quadrantenelektrometer benutzt, um dessen Ladung genau zu reguliren. Auch die von Wimshurst gebaute Influenzmaschine beruht auf diesem Principe.

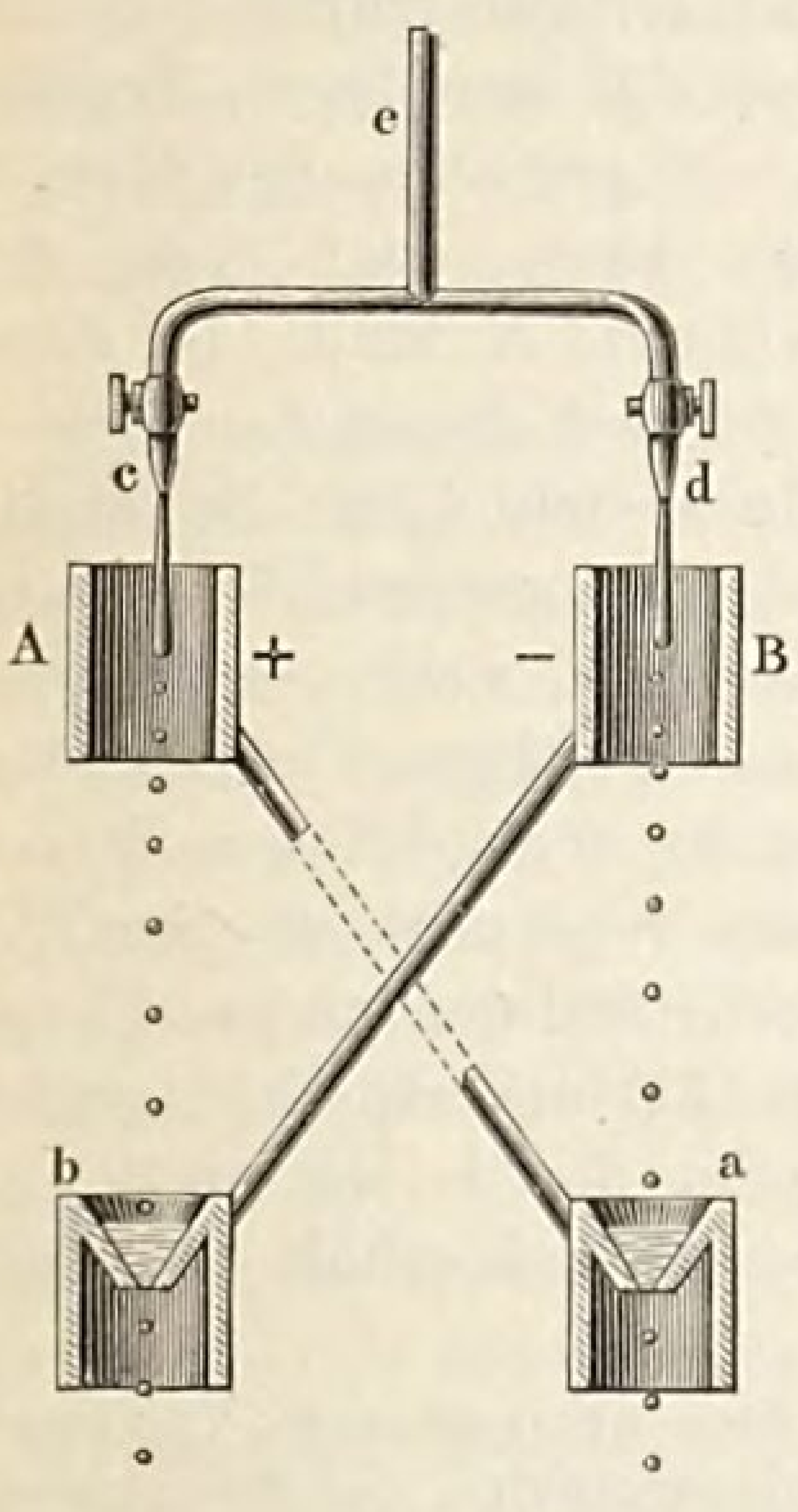
Es ist nicht schwer, Analogien des Varley'schen Apparates mit der Holtz'schen Maschine aufzustellen. Die Papierbelegungen der letzteren entsprechen den Vertheilern, die bewegliche Scheibe den Uebertragern bei Varley, die Papierspitzen und Kämme den Contactfedern. Nichtsdestoweniger besteht ein wesentlicher Unterschied in Hinsicht des Princips, ganz abgesehen von der von Holtz eingeführten, ungemein wirksamen Benutzung eines Isolators zur Aufnahme und Fortführung

*) Phil. Mag. Januar 1868.

der Influenzelektricitäten. Die Varley'sche Maschine bezweckte nichts weiter, als die automatische Vervielfältigung der Elektricität auf den Vertheilern *A* und *B*, Fig. 156. Der Apparat ist daher hinsichtlich des Princips zu der Classe der Duplicatoren zu rechnen *), seine Benutzung wäre nur insofern etwa mit derjenigen der Holtz'schen Maschine zu vergleichen, als auch die Papierbelegungen der letzteren, wenn auch gewiss nicht mit Vortheil, als Elektricitätsquellen benutzt werden könnten.

W. Thomson hat eine sinnreiche Vorrichtung angegeben, um mittelst fallender Wassertropfen den oben besprochenen Duplicatorprocess zu verwirklichen **). Aus einem mit der Erde leitend verbundenen gegabelten Wasserrohre *ecd*, Fig. 157, fliessen zwei Wasserstrahlen so aus, dass die Stellen, wo dieselben in Tropfen zerreissen, innerhalb zweier hohler Metallcylinder *A* und *B* zu liegen kommen. Die Tropfen aus *A* fallen in einen Trichter bei *b*, die aus *B* in den Trichter *a*. *A* ist mit *a*, *B* mit *b* leitend verbunden, im Uebrigen sind beide sorgfältig isolirt. Man sieht sofort, dass, wenn einer der Cylinder, z. B. *A*, schwach elektrisirt wird, die fallenden Tropfen genau die Rolle der Uebertrager, *b* und *a* diejenige der gleichbezeichneten Contactfedern in Fig. 156 spielen. Die Tropfen in *A* werden durch Influenz mit entgegengesetzter Elektricität geladen, diese gelangt von *b* nach *B* u. s. w.

Fig. 157.



Fragt man nach dem gemeinsamen Constructionsprincip der Töpler- und Holtz'schen Influenzmachinen, so erkennt man leicht, dass dasselbe nicht allein in dem Multiplicationsprocesse besteht. Wie schon zu Anfang des §. 61 gesagt wurde, so bezwecken diese Maschinen eine möglichst continuirliche Eelektricitätsentwickelung. Dieser Zweck ist bei den von Töpler und Holtz für den eigentlich praktischen Gebrauch bestimmten Apparaten dadurch erreicht, dass die influenzirende Elektricität durch einen dem oben untersuchten mehr oder weniger analogen Multiplicationsprocess angehäuft und auf einem Spannungsmaximum erhalten wird, während zu gleicher Zeit an der Maschine nutzbare Influenzelektricität in solcher Weise gewonnen wird, dass die influenzirende intact bleibt.

*) Vergl. auch William Thomson, „Reprint of papers on electrostatics and magnetism", 1872, p. 339, §. 429; ferner Töpler, Berl. Ber. 11. Dec. 1879, S. 952.

**) Der Thomson'sche Wassertropfenduplicator findet sich in dem „Reprint of papers etc." p. 321.

Diesen Grundgedanken verwirklicht Holtz in der schon früher besprochenen Weise. In der That lässt der aus den Kämmen der Hauptconductoren entnommene Strom die influenzirende Elektricität der Papierbelegungen unberührt; ja sogar für den Fall des völligen Erlöschens des Hauptstromes wird der Multiplicationsprocess durch die Hülfskämme aufrecht erhalten *).

Ganz denselben Grundgedanken hat unmittelbar vor Holtz schon Töpler ausgesprochen **) und nachher auch verwirklicht, freilich in anderer Weise. Man fasse zum Zwecke der Erläuterung nochmals Fig. 156 ins Auge. Der untere, punktirt und schraffirt gezeichnete Theil der Figur sei eine Nachbildung des oberen Varley'schen Duplicators, dem jedoch an den Vertheilern A' und B' die Contactfedern fehlen. Auch seien die punktirten Verbindungen x und y noch nicht vorhanden. Man erkennt sofort, dass diese Vorrichtung nicht multipliciren kann. Sobald man aber A' und B' von aussen (etwa durch Verbindung mit Conductor und Reibzeug einer Elektrisirmaschine) dauernd mit $+E$ und $-E$ ladet, erhält man in der bei $e'f'$ trennbaren Verbindung $c'ge'f'hd'$ einen Funkenstrom ähnlich wie zwischen den Hauptconductoren der Holtz'schen Maschine. Man kann sogar einen der beiden Vertheiler, z. B. A', allein anwenden, während B' fehlt. Ist dann die Leitung bei g mit der Erde verbunden, so wird die in den Uebertragern durch Berührung mit c' erlangte Influenzelektricität beständig nach d' transportirt. Man hat in der einen oder andern Weise eine unselbstständige Maschine, d. h. eine Maschine, welche neben der Influenz die andauernde Mitwirkung einer anderweitigen Elektricitätsquelle voraussetzt. Solche Maschinen können in verschiedener Weise, auch mit beweglichem Isolator und Kämmen, construirt werden ***). Nun entsteht offenbar das Schema zu einer vollständigen und selbstständigen Influenzmaschine, indem man in Fig. 156 die Vertheiler A und B durch Leitungen x und y mit A' und B' verbunden denkt. Der an A und B sich abspielende Multiplicationsprocess erzeugt und erhält auch auf

*) Es ist nicht ohne Interesse, zu erwähnen, dass auch an dem Varley'schen Apparate dem im Rede stehenden Constructionsprincipe der Hauptsache nach hätte entsprochen werden können, wenn, wie Thomson richtig bemerkt hat, die im Verbindungsbügel ced (Fig. 156) fliessenden Influenzelektricitäten benutzt worden wären. Dass dies nicht geschah, zeigt, dass Varley eben nur den Multiplicationsprocess im Auge hatte. Ferner ist zu bemerken, dass der früher erwähnte Apparat von Belli ebenfalls durch geeignete Zuthaten den obigen Anforderungen entsprechend hätte modificirt werden können.

**) Pogg. Ann. Bd. 125, S. 469. Insbesondere ist auf den letzten Theil der Abhandlung (S. 494 bis 496) aufmerksam zu machen, woselbst die vollständige von Töpler beabsichtigte Maschine erläutert ist. Der gewöhnlich als „Töpler's Maschine" bezeichnete Apparat ist nur ein Bestandtheil derselben und zwar derjenige, welcher von Töpler zuerst ausgeführt wurde.

***) Es sind verschiedene Combinationen der Reibungselektrisirmaschine mit unselbstständigen Influenzmaschinen angegeben worden, z. B. von Holtz, Carré u. s. w., die interessanteste wohl von Kundt, Pogg. Ann. Bd. 135, S. 484.

A' und B' ein Spannungsmaximum; der auf den Conductoren $c'g$ und $d'h$ verfügbare Strom lässt die influenzirenden Elektricitäten intact. Denkt man sich die beiden Rotationsmechanismen auf einer einzigen Axe angebracht, so hat man mit Abweichungen, die für das Princip nicht wesentlich sind, das Schema, welches Töpler in seiner ersten Abhandlung für die Construction einer vollständigen Maschine empfohlen hat. Bei der späteren Ausführung *) wurde der multiplicirende Theil der Maschine „Generator" genannt, während der unselbstständige als Stromgeber fungirte.

Einige Jahre später ist der in Rede stehende Grundgedanke einer möglichst continuirlichen Elektricitätsentwickelung durch Influenz unter Beihülfe eines Multiplicationsprocesses noch ein drittes Mal, und zwar ebenfalls ganz unabhängig, von W. Thomson verwirklicht worden **). Derselbe verband seinen Replenisher mit einer unselbstständigen Maschine ganz in derselben Weise wie Töpler den Generator mit dem Stromgeber.

Jedenfalls haben die auf der Anwendung eines durch Spitzenwirkung geladenen Isolators beruhenden Constructionen von Holtz durch ihre Einfachheit und vortreffliche Wirkung am meisten dazu beigetragen, die Aufmerksamkeit der Physiker auf die neuen Apparate hinzulenken.

Neuerdings hat nun Töpler die Influenzmaschine nach gewissen Richtungen noch weiter ausgebildet, wobei selbstverständlich die inzwischen von Holtz und Anderen gemachten Studien und Erfahrungen mit benutzt wurden. Nach den vorangegangenen Erörterungen können wir unsere Mittheilungen auf das Wesentliche beschränken.

Obwohl die mit metallischen Uebertragern und Contactfedern construirten Maschinen begreiflicherweise durch Seitenentladungen und sonstige Elektricitätsverluste beeinträchtigt wurden und daher nur bei unbehülflich grossen Dimensionen die hohe Spannung der Holtz'schen Maschinen erreichen konnten, so besassen sie doch eine andere schätzenswerthe Eigenschaft. Während letztere Maschine, um in Gang zu kommen, von vornherein kräftig elektrisirt werden muss, damit die Spitzenkämme in Wirksamkeit treten, was in der feuchten Luft gefüllter Hörsäle manchmal nur schwer zu erreichen ist, erwies sich der Töpler'sche Generator als ungemein leicht erregbar, ja er kam, wenn er gedreht wurde, von selbst in Gang. Schon an Nicholson's Duplicator war diese Erscheinung bemerkt worden, weshalb das Instrument seinem eigentlichen Zwecke wenig entsprach; auch constatirte sie Thomson später an seinem Replenisher. Die Thatsache ist leicht zu erklären. Nach der oben gegebenen mathematischen Darstellung des Duplicatorprocesses muss, wenn guter Federcontact besteht, die Multiplication für jede, auch die mit den feinsten Hülfsmitteln nicht mehr wahrnehmbare Differenz des elektrischen

*) Pogg. Ann. Bd. 127 und 130.

**) Phil. Mag. Januar 1868; desgl. „Reprint etc." §. 416 bis 420.

Zustandes der Vertheiler stattfinden. Nun werden unmerklich schwache Elektrisirungen und Unterschiede derselben durch zufällige Ursachen in der Regel eben sowohl vorhanden sein, als z. B. unmerklich kleine Temperaturdifferenzen. Solche Elektrisirungen würden, wenn sie nicht vorhanden wären, schon durch die beim Handhaben der Maschine in der Nachbarschaft unvermeidlichen Reibungsprocesse und deren Influenzwirkung auf die Metallflächen entstehen und multiplicirt werden; das Ausbleiben der Selbsterregung müsste eher in Erstaunen setzen als deren Eintreten. Die Selbsterregung ganz bestimmten Ursachen, z. B. nur der Reibung der Contactfedern oder gar der Luftelektricität zuzuschreiben, ist nicht gerechtfertigt; in der That ist die Art der Elektrisirung, welche sich beim Drehen herausstellt, von Fall zu Fall verschieden.

Fig. 158.

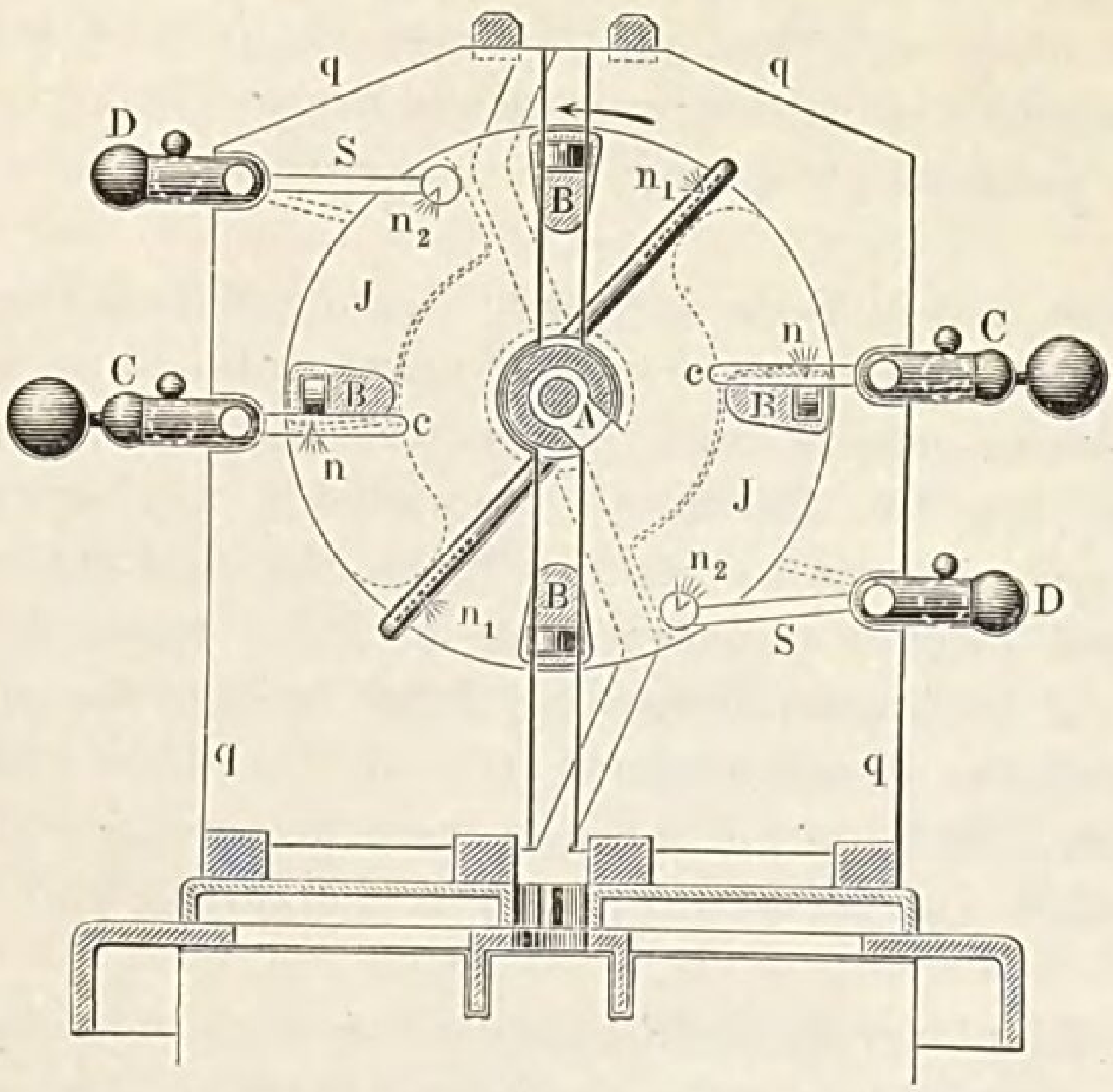
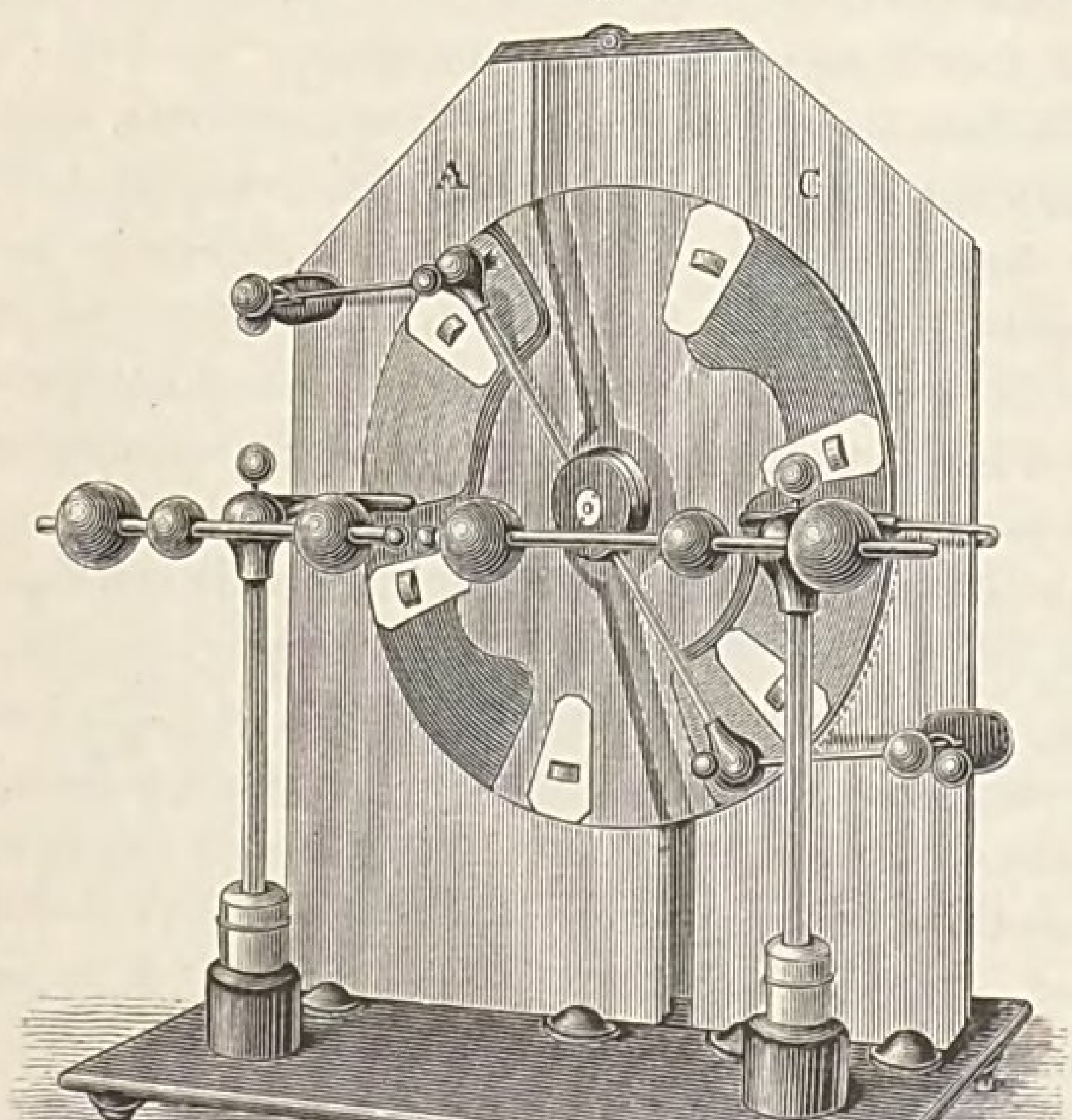


Fig. 159.



Töpler war nun darauf bedacht, die erwähnte Eigenschaft auch für Maschinen mit Spitzenkämmen nutzbar zu machen; er erreichte dies durch eine verhältnissmässig einfache Zuthat zur Holtz'schen Maschine, wodurch die in Fig. 158 schematisch, Fig. 159 perspectivisch

abgebildete, neuerdings in Gebrauch gekommene Influenzmaschine mit Selbsterregung entstand*).

Eine bewegliche Glasscheibe rotirt vor zwei festen, entsprechend durch Hartgummileisten gehaltenen Glasstücken qq, welche in der aus der Figur ersichtlichen Weise mit den krummgeschnittenen Rändern einander gegenüberstehen und seitlich aus der Maschine hervorgezogen werden können. Auf der Vorderseite der rotirenden Scheibe sind vier kleine abgerundete Stanniolflecke BB (Uebertrager) mit leichten leitenden Hervorragungen aufgeklebt. Letztere bestehen aus dachförmigen, mit dünnem Messingblech überzogenen Korkstückchen. Vor der beweglichen Scheibe sind Conductoren SD, SD und Cc, Cc befestigt, welche weiche Metallschnurpinsel n und n_2 tragen, die beim Vorübergehen der Uebertrager mit deren Hervorragungen in Contact kommen. Ausserdem befindet sich vor der beweglichen Scheibe noch ein fester, um die Axe greifender, diametraler Conductor A, ebenfalls mit Contactpinseln bei $n_1 n_1$. Die Befestigungsweise der genannten Conductoren ist in der Figur nicht gezeichnet. Auf der (dem Beschauer abgewandten) Rückseite der festen Glasstücke qq sind sichelförmige Belegungen JJ angebracht, welche von n_1 bis n_2 reichen und zwischen $n_2 n$ aus Stanniol, zwischen $n n_1$ aus Papier gemacht sind. Mit diesen Belegungen sind (durch die punktirten Leiter) die Conductoren SD, also auch die Pinsel n_2 verbunden.

Man erkennt sofort, dass bei der Rotation der Scheibe im Sinne des Pfeiles (der Uhrzeigerbewegung entgegen) die bisher geschilderten Theile ähnlich wie ein Varley'scher Duplicator, und zwar „selbsterregend“ wirken, wenn man nur zu Anfang zwischen den Hauptconductoren C und C leitende Verbindung herstellt. Es entwickelt sich eine steigende Spannungsdifferenz auf den ruhenden Belegungen JJ. Nun besitzen aber sowohl die Conductorenarme cc, als auch der diametrale Conductor A neben den Contactpinseln nach der beweglichen Scheibe gewendete Spitzenreihen, ganz wie die betreffenden Conductoren der Holtz'schen Maschine**). Diese Spitzenreihen kommen bei hinreichender Ladung von JJ ebenfalls in Thätigkeit und elektrisiren die ganze Ringfläche der beweglichen Scheibe, auch zwischen den Uebertragern. Von jetzt ab wirkt die Maschine wie die Holtz'sche. Die Elektrisirung des Glases

*) In Wirklichkeit sind die Theile einer solchen einfachen Maschine selbstverständlich in bequemer und handlicher Weise angeordnet, wie aus Fig. 159 zu ersehen ist. Die scheinbar unbehülflichen Verhältnisse der Fig. 158 erklären sich daraus, dass dieselbe in einer alsbald ersichtlichen Beziehung zu den nächstfolgenden Figuren steht, zur Erleichterung des Verständnisses.

**) In Fig. 158 sind die Pinselcontacte nn u. s. w. so gestellt, dass sie nahe dem Rande der beweglichen Scheibe gegenüberstehen. Bei der praktischen Ausführung werden sie zweckmässig mehr nach der Mitte hin an den Conductorarmen c und c u. s. w. befestigt, so dass sie in eine Lücke der an diesen Armen befindlichen Spitzenkämme zu stehen kommen. Die metallischen Uebertrager sammt Pinselcontacten lassen sich auch nachträglich an Holtz'schen Maschinen anbringen.

zwischen den Uebertragern hindert die Ausstrahlung aus den Rändern derselben; dadurch steigt die Spannung so weit, dass zwischen den mit den Hauptconductoren *C* verbundenen Entladerarmen, wenn diese mit geeigneten Condensatoren bewaffnet sind, Funken überspringen, deren Schlagweite etwa derjenigen der Holtz'schen Maschine entspricht.

Fig. 159 stellt die Vorderansicht einer Maschine dieser Art, jedoch ohne diametralen Conductor und mit sechs Uebertragern dar. Auch befindet sich hinter den festen Glasstücken *A* und *C* noch eine zweite bewegliche Scheibe ohne Uebertrager, weshalb die Hauptconductoren rechts und links um die festen Glasstücke herumgreifen, um die rückwärts befindlichen Kämme zu tragen.

Bei der beschriebenen Form der Maschine mag die Selbsterregung meistens wohl den hartnäckig auf den Isolatorflächen verbleibenden Rückständen von früherem Gebrauch zuzuschreiben sein; jedoch sei erwähnt, dass Töpler eine Maschine dieser Art 15 Stunden unter Wasser setzte; in warmer Luft getrocknet, ging sie von selbst wieder an *). Ueber die Art der Polarität ist man rasch durch Anlegen einer kleinen Geissler'schen Röhre mit isolirendem Handgriff an die Hauptconductoren orientirt.

Die Maschine verhält sich gegen mässig feuchte Luft ziemlich indifferent; Boltzmann berichtet von einer Töpler'schen Maschine dieser Art, dass sie selbst bei monatelanger angestrengter Thätigkeit (manchmal 8 bis 10 Stunden täglich) den Dienst niemals versagte **). Bei sehr feuchter Luft (80 Proc. und mehr) findet während des Ganges der Maschine allerdings zuweilen ein störender freiwilliger Polwechsel statt, auch geht sie schwächer, selten versagt sie ganz; man überdeckt die Maschine daher zweckmässig mit einem Glasgehäuse, dessen Luftinhalt durch eine hygroskopische Substanz oder einen erwärmten Luftstrom getrocknet wird.

Sehr erhebliche quantitative Leistungen erzielte Töpler durch die Construction von Influenzmaschinen mit grosser Wirkungsfläche in kleinem Raume, und zwar auf Grund der folgenden Erwägungen.

Die Ueberlegenheit der Influenzmaschine über die gewöhnliche Reibungselektrisirmaschine ist hauptsächlich in der weit günstigeren Ausnutzung der beim Drehen aufgewendeten mechanischen Arbeit begründet. Bei der Reibungsmaschine kommt nur ein unverhältnissmässig kleiner Theil dieser Arbeit der Elektricitätsentwickelung zu Gute; der weitaus grössere Theil wird nutzlos durch Reibungswärme, Abnutzung der Reibflächen etc. verbraucht. Die Influenzmaschine dagegen braucht,

*) Elektrotechn. Zeitschrift, Oct. 1882, S. 372.

**) Wiener Sitzungsberichte 1873, Bd. 68, II. Abth., S. 81. Genauer beschrieben wurde die Maschine zuerst im Tageblatt der Casseler Naturforscherversammlung von 1878, S. 140, damals mit sechs Uebertragern. Die Maschinen werden von den Mechanikern Herren Leuner in Dresden und Voss in Berlin gefertigt; Letzterer führt sie so aus, dass durch die Vertauschung der beweglichen Scheibe mit einer unbelegten die gewöhnliche Holtz'sche Maschine entsteht.

wenn sie leer geht, d. h. keinen Strom entwickelt, wenig Kraftanstrengung, um gedreht zu werden. Ist die Maschine aber angeregt, so dreht sie sich merklich schwerer. Der in letzterem Falle nöthige Mehrbetrag an mechanischer Arbeit setzt sich in elektrische Energie um. Man versteht den Hergang dieses Arbeitsumsatzes leicht, wenn man bedenkt, dass bei der Drehung der Maschine die durch Influenz elektrisirten beweglichen Theile von den influenzirenden Flächen (Papierbelegungen, Vertheilern) angezogen werden. Diese Anziehung sucht die Bewegung der influenzirten Flächen zu hemmen und muss beim Gange der Maschine fortwährend überwunden werden. Eben dadurch entsteht in den fortbewegten Theilen elektrische Energie, d. h. verfügbare Elektricität mit Spannung. (Das Nähere über den Begriff der elektrischen Energie folgt später.)

Durch einen hübschen, zuerst von Holtz*) angestellten Rotationsversuch lässt sich zeigen, dass auch der umgekehrte Process, nämlich der Umsatz elektrischer Energie in mechanische Arbeit, zu Stande kommt. Leitet man auf die Hauptconductoren einer Influenzmaschine, deren Entladerkugeln sich nicht berühren dürfen, von einer zweiten Maschine $+$ und $-E$, so geräth die erstere in lebhafte Rotation, sobald man ihrer Scheibe einen Anstoss in negativem Drehsinne ertheilt. Man könnte mit ihr eventuell mittelst eines um ihre Axe geschlungenen Fadens ein Gewicht heben, kurz, mechanische Arbeit gewinnen. Dabei werden die zugeführten Elektricitäten ausgeglichen, d. h. ihre elektrische Energie wird verbraucht. Das System der beiden Maschinen ist gewissermaassen eine Vorrichtung für elektrische Arbeitsübertragung, bei welcher die überströmende Elektricität die Rolle eines Uebertragungsmittels spielt. Damit das Experiment sicher gelingt, ist die Treibschnur von der mit zu bewegenden Maschine abzulösen.

Nun beträgt bei der einfachen Influenzmaschine gewöhnlicher Grösse der erforderliche Arbeitsaufwand nur einen Bruchtheil eines Meterkilogramms per Secunde, während man beim Experimentiren ohne Ermüdung 5 mkg und mehr leisten kann. Es erschien also zweckmässig, Maschinen für grösseren Arbeitsumsatz zu construiren. Zu diesem Zwecke kam Töpler auf die Ausführung eines schon in seiner ersten Abhandlung angegebenen Planes zurück, indem er eine grosse Anzahl unselbstständiger Einzelmaschinen dicht hinter einander so anordnete, dass ihre rotirenden Platten auf derselben Rotationsaxe steckten, und dass alle zusammen von einem und demselben „Generator" angeregt wurden**). So entstand eine vielplattige Maschine, von welcher ein Schnitt senkrecht zur Rotationsaxe ungefähr in der Mitte des Plattensystems in

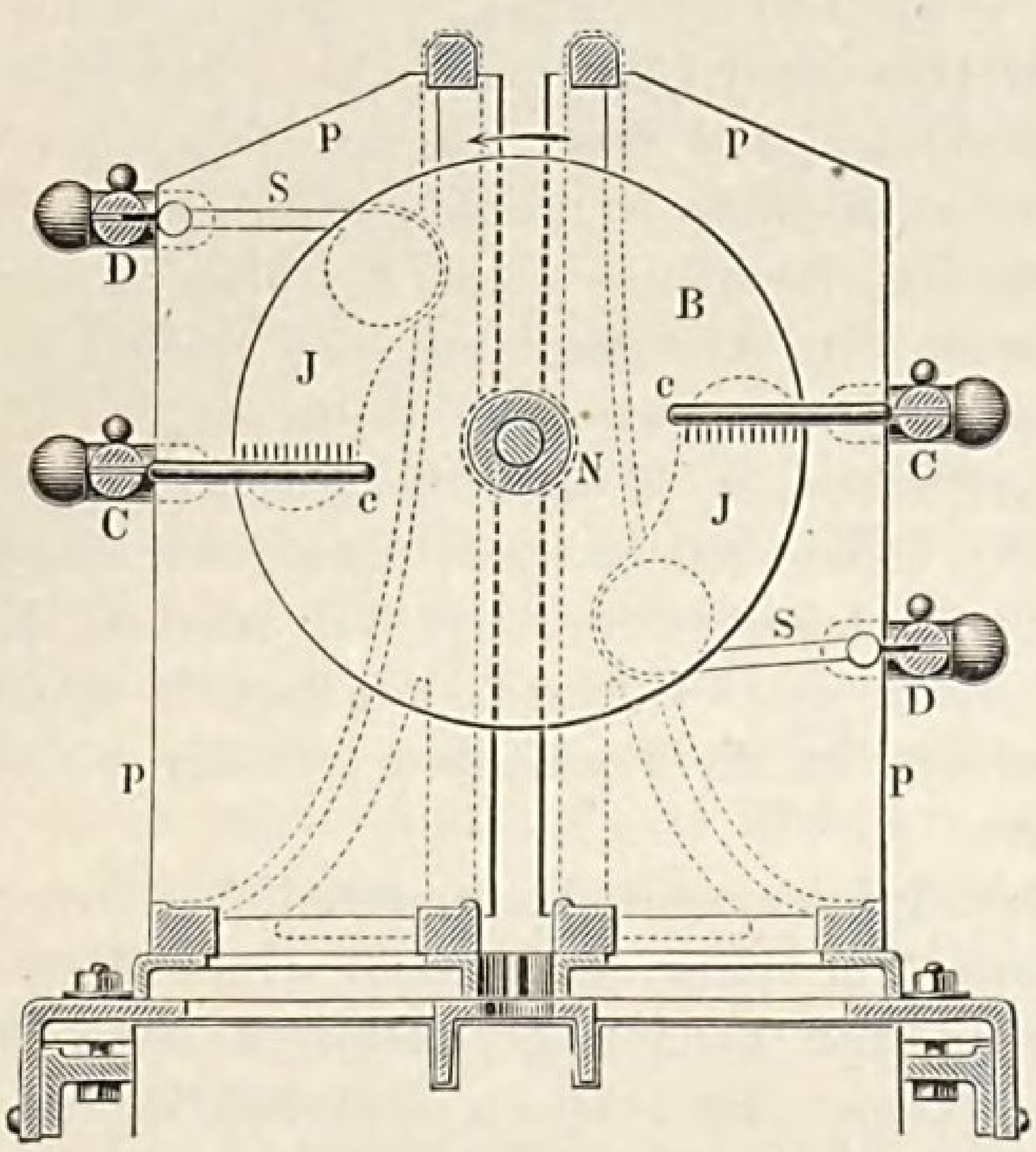
*) Pogg. Ann. Bd. 139, S. 513, 1870.

**) Berl. Akad. Ber., 11. Dec. 1879: „Ueber die Vervollkommnung der Influenzmaschine". Die genauere Beschreibung nebst Abbildung von Töpler's neueren zusammengesetzten Maschinen findet sich in dem Aufsatze „Influenzmaschine und Inductorium". Elektrotechn. Zeitschr., 18. Oct. 1882, welchem auch die Fig. 158, 160 und 161 entnommen sind.

Fig. 160 zu sehen ist. Diese Figur lässt also die Bestandtheile einer der unselbstständigen Einzelmaschinen erkennen, die wir zunächst betrachten.

Die unbelegte gefirnisste Kreisscheibe *B* von Glas rotirt im Sinne des Pfeiles (gegen den Uhrzeiger) vor zwei getrennten Glasstücken *pp*, auf deren Rückseite die bogenförmigen Papiervertheiler *JJ* aufgeklebt sind. Die punktirten Kreise bedeuten Stanniolflecke, welche die Vertheiler vermöge der Leiterstreifen *SS* mit den Conductoren *DD* in Verbindung setzen. Vor der Kreisscheibe stehen, an *CC* befestigt, die schmalen Kämme *cc* mit langen Saugspitzen, welche nicht senkrecht zur Kreisscheibe, sondern gegen den Rotationssinn gerichtet sind, was ihre Wirkung nicht hindert. Man erkennt ohne Weiteres, dass die Conductoren *CC* einen Strom geben, sobald die Vertheiler *JJ* vermittelst der Zuleiter dauernd + und — elektrisirt werden. Die Anordnung erinnert an eine Holtz'sche Maschine, welcher die Papierspitzen und die Durchbrechungen der festen Scheibe fehlen. Es ist zu bemerken, dass die Kämme dem hinteren Ende der Vertheiler, im Rotationssinne gerechnet, ungefähr gegenüberstehen. Dies veranlasst eine grosse Erregbarkeit der Anordnung, indem die gegen die Papierbelegungen hin bewegten Scheibentheile, wenn sie durch die Kämme zuerst schwach elektrisirt sind, nunmehr auf die Belegungen selbst vertheilend wirken, wodurch eine stärkere Anhäufung der mit jenen Scheibentheilen gleichnamigen Elektricität gegenüber den Kammspitzen bewirkt wird*).

Fig. 160.



Nun sind bei der vielplattigen Maschine sehr viele Vorrichtungen der an Fig. 160 beschriebenen Art in kleinem Raume derartig vereinigt,

*) Töpler hat durch Aufstellung der betreffenden Vertheilungsformeln und durch Experimente gezeigt (Berl. Ber. Dec. 1879, S. 961 bis 965), dass eine einzelne Vorrichtung der oben beschriebenen Art durch momentane Annäherung eines stark elektrisirten Körpers sogar in andauernde Thätigkeit versetzt werden kann, indem sich eine ganz eigenthümliche Art von Multiplicationsprocess auf ihr entwickelt, obwohl den Vertheilern gar keine Elektricität zugeführt wird. Als selbstständige Maschine kann eine derartige Vorrichtung nur deshalb nicht dienen, weil sie, allein benutzt, die Stromrichtung periodisch ändert.

dass immer je zwei derselben in umgekehrter Anordnung (wie Spiegelbilder), von vorn nach hinten gerechnet, auf einander folgen. So sind z. B. die Vertheiler JJ auch nach hinten von Glasplatten von der Form pp bedeckt. Dicht dahinter folgt wieder eine rotirende Kreisscheibe, hinter dieser wieder ein Kammpaar wie cc u. s. w. Auf diese Weise wirkt jedes Paar Vertheiler nach vorn und hinten, also auf zwei Kreisscheiben und zwei Kammpaare zugleich. Ferner bedenke man, dass in Fig. 160 nach vorn unmittelbar vor den Kämmen cc wieder eine rotirende Scheibe folgt, dann wieder Vertheiler u. s. w. Jeder Kamm wird also auch doppelt ausgenutzt, d. h. er elektrisirt die beiden ihm zunächst stehenden Kreisscheiben gleichzeitig. Auf jeder Seite des ganzen Plattensystems sind die Vertheiler durch je einen der Axe parallelen Längsconductor bei D und D mit einander verbunden; daher kommen alle Glieder des Systems gleichzeitig in Gang, wenn man jene Conductoren mit einem gemeinsamen Generator elektrisirt. Dieser ist ganz einfach dadurch hergestellt, dass die beiden Endglieder der Plattenreihe nebst den zugehörigen Bestandtheilen als selbsterregende Maschinchen genau nach dem Schema der Fig. 158 organisirt sind. Da ferner alle Kämme cc an zwei gemeinsamen Längsconductoren bei C und C befestigt sind, so gewinnt man aus diesen letzteren den Gesammtstrom der ganzen Maschine.

Bezüglich der sonstigen Einrichtung sei nur bemerkt, dass jede Kreisscheibe an ihrer centralen Durchbohrung eine Nabe (Verdickung) N aus isolirendem Material (Gyps mit Schellack) besitzt. Diese Naben bedingen den gegenseitigen Abstand der Kreisscheiben, welche alle hinter einander auf die Stahlaxe gesteckt und durch zwei Pressschrauben an den Enden zusammen- und festgehalten werden. Die festen Glasplatten pp sammt Vertheilern, Kämmen u. s. w. lassen sich zu beiden Seiten leicht aus dem System herausnehmen, wodurch die Kreisscheiben freigelegt werden.

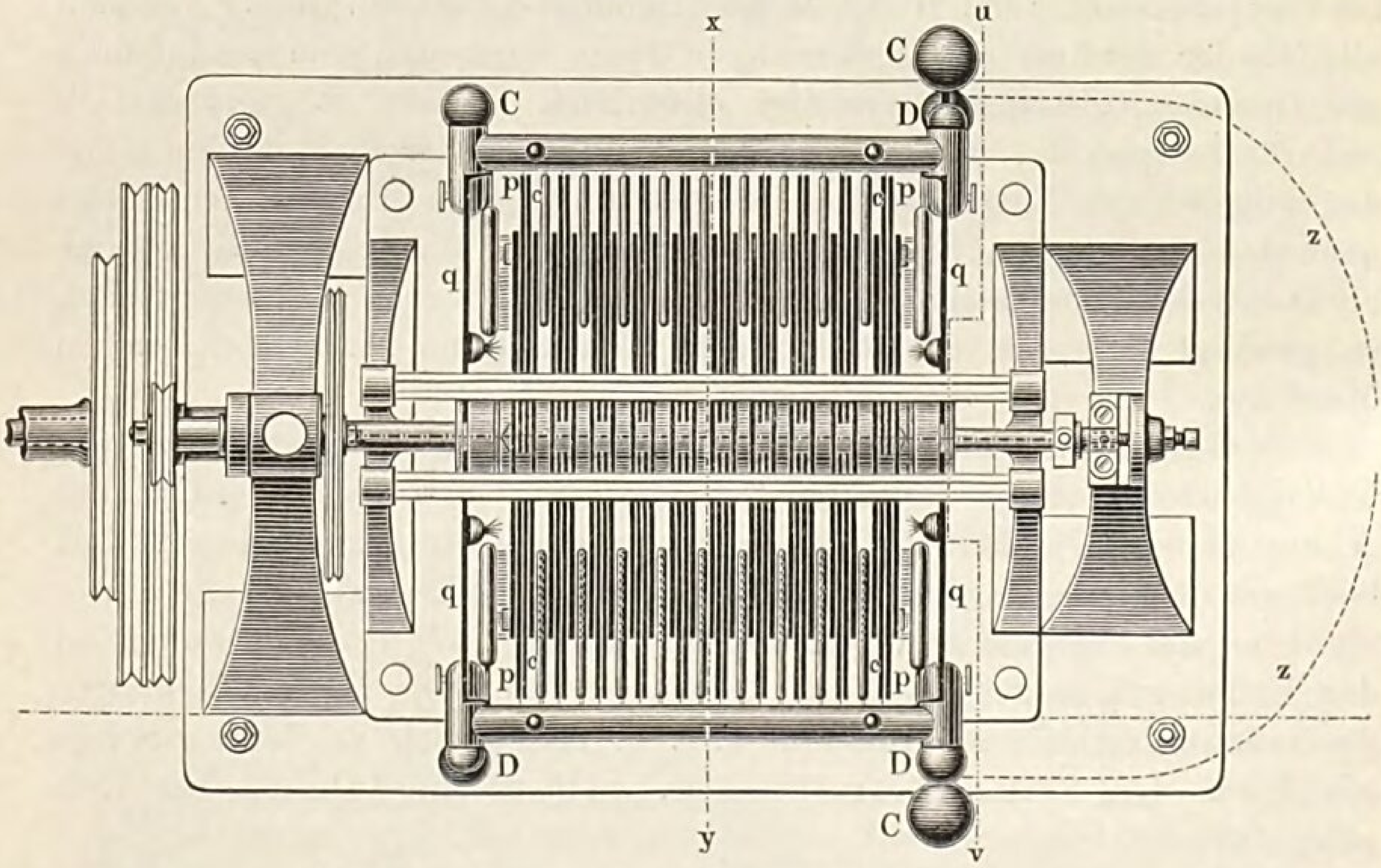
In Fig. 161 (a. f. S.) ist ein Grundriss der vielplattigen Maschine abgebildet; man erkennt, wie die Vertheilerplatten p und die Kämme c in die abwechselnden Zwischenräume der beweglichen Kreisscheiben eingreifen. Mittelst der Leitungen z und z wird der Maschinenstrom seiner Benutzung zugeführt. Ein Durchschnitt der Maschine längs der punktirten Linie uv entspricht der Ansicht in Fig. 158, ein Durchschnitt längs xy der Fig. 160.

Eine Maschine mit 20 beweglichen Scheiben von nur 26 cm Durchmesser, wie sie vom Mechaniker Leuner in Dresden für grössere physikalische Laboratorien ausgeführt wird, nimmt mit ihrem Plattensystem ohne den Rotationsmechanismus etc. einen Raum von etwa $^1/_{20}$ cbm ein und ist für Drehgeschwindigkeiten bis zu 20 Touren in der Secunde bestimmt. Ihre maximale Schlagweite entspricht dem halben Scheibendurchmesser; sie ladet eine Batterie von 18 Leydener Flaschen ($2^1/_3$ qm Oberfläche) bereits in 3 Secunden bis auf eine Schlagweite von

30 mm zwischen Kugeln von 8 mm Durchmesser*). Die Maschine gestattet also, mit grossen Batterieladungen ebenso rasch und bequem zu arbeiten, wie man sonst mit einfachen Funken der Elektrisirmaschine experimentirte. Die magnetischen Wirkungen des Maschinenstromes genügen schon, um ein feines polarisirtes Relais von Siemens zum Sprechen zu bringen. Der zum Drehen erforderliche Kraftaufwand beträgt etwa 4 mkg per Secunde. Die gelieferten Elektricitätsmengen sind, wie bei anderen Influenzmaschinen, der Rotationsgeschwindigkeit angenähert proportional.

Eine noch grössere Maschine mit 60 Scheiben, wohl die ergiebigste Maschine dieser Art, hat Leuner auf der elektrischen Ausstellung in

Fig. 161.



Wien vorgezeigt. Dieselbe ladet eine mittelgrosse Leydener Flasche gegen 40 Mal in der Secunde, so dass der Entladungsstrom einen scheinbar continuirlichen Lichtfaden von 1,4 Kerzenstärken giebt. Batteriefunken folgen so rasch, dass ein dünner Platindraht dauernd im Glühen erhalten wird. Dieselbe Maschine veranlasst sichtbare Wasserzersetzung in einem Voltameter, dessen Elektrodenplatten 1 qcm Fläche besitzen.

Eine kleinere aus sechs Scheiben bestehende sehr wirksame Maschine dieser Art hatte Leuner bei Gelegenheit der Naturforscherversammlung in Wiesbaden 1887 ausgestellt. Dieselbe war in einem Glaskasten eingeschlossen und nicht gefirnisst, was ihre Wirkung nicht beeinträchtigte, da die Luft im Kasten stets trocken erhalten werden konnte. Die

*) Vergl. A. Töpler, „Zur Kenntniss der Influenzmaschine und ihrer Leistungen“, Elektrotechn. Zeitschr. Febr. 1880, und „Influenzmaschine und Inductorium“, ibid. Oct. 1882.

Maschine ist deshalb auch in besuchten Hörsälen leicht und sicher in Gang zu setzen.

Um der unbequemen Eigenschaft der reichlichen Ozonentwickelung zu begegnen, stellt man nach G. Wiedemann Schalen mit Leinöl in den bedeckenden Kasten.

Schliesslich wollen wir erwähnen, dass nach Untersuchungen von W. Hempel die von der Influenzmaschine gelieferte Elektricitätsmenge sowohl von der Natur als auch ganz besonders von dem Druck des Gases, in welchem sie arbeitet, beeinflusst wird. Hempel setzte eine selbstladende Influenzmaschine unter einer hermetisch abgesperrten Glocke, deren Inhalt mit Schwefelsäure getrocknet wurde, mit einem kleinen, ebenfalls unter der Glocke befindlichen, elektromagnetischen Motor in Bewegung. Der treibende Strom wurde von einer ausserhalb befindlichen galvanischen Kette zugeführt. Der Gasdruck konnte innerhalb mehrerer Atmosphären verändert werden. Es zeigte sich, dass die Maschine, welche mit einer ausserhalb befindlichen Maassflasche verbunden war, in Wasserstoff weniger, in Luft und Kohlensäure mehr Entladungen bei derselben Gesammtzahl von Drehungen lieferte. Wurde der Druck in der Glocke gesteigert, so ergab sich eine stetige, und zwar sehr bedeutende Zunahme der Ergiebigkeit; dieselbe betrug bei einem Ueberdruck von drei bis vier Atmosphären etwa das Drei- bis Vierfache für Luft, das Sechsfache für Wasserstoff im Vergleich zur Ergiebigkeit bei gewöhnlichem Luftdrucke. Bei Druckverminderung auf etwa eine halbe Atmosphäre versagte die Maschine *).

Versuche mit der Elektrisirmaschine. Mit der Elektrisir- 63
maschine lassen sich zahlreiche Versuche anstellen, welche dazu dienen, die bisher besprochenen Gesetze der Elektricität zu erläutern. Bei den Versuchen, wo es auf grosse Spannung (lange Funken, Durchbohrungen von Isolatoren) ankommt, wird eine gute Reibungselektrisirmaschine vortheilhafter sein, im Uebrigen gelingen die Experimente mit der Influenzmaschine wegen der grösseren Elektricitätsmenge besser und schneller. Leitet man einen Conductor derselben zur Erde ab, so kann man den anderen ebenso benutzen, wie den Conductor der Reibungselektrisirmaschine.

Der Kugeltanz, welcher eigentlich nur eine bessere Form des Fig. 102, S. 123 dargestellten Versuches ist, lässt sich am einfachsten dadurch hervorbringen, dass man den Deckel des Elektrophors, Fig. 134, S. 157, an seinen Schnüren so aufhängt, dass seine untere Fläche 5 bis 8 cm hoch über dem mit Stanniol beklebten Brette *cc* schwebt. Werden nun an die Stelle des entfernten Harzkuchens Hollundermarkkügelchen gelegt, so tanzen diese zwischen den beiden metallischen Platten hin und her, sobald man die obere Platte in leitende Verbin-

*) W. Hempel, „Die Hochdruck-Influenz-Elektrisirmaschine", Wied. Ann. 1885, Bd. 25, S. 487.

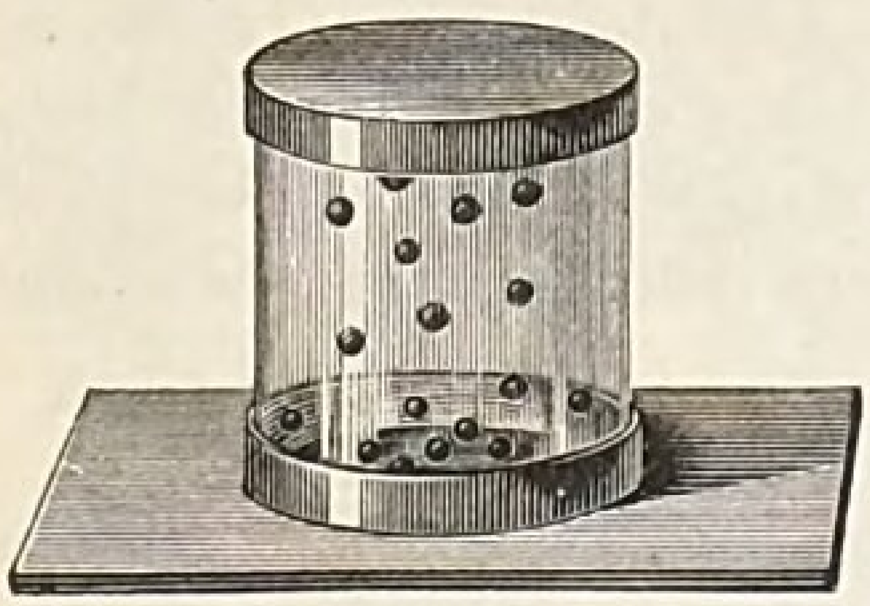
dung mit dem Conductor einer in Thätigkeit gesetzten Elektrisirmaschine bringt.

Man hat die leichten Kügelchen durch gemalte und ausgeschnittene Papierfigürchen oder durch leichte Püppchen von Hollundermark ersetzt und erhielt so den elektrischen Puppentanz.

Bei dem eben beschriebenen Versuche fahren die Kügelchen leicht nach den Seiten aus einander; um dies zu verhindern, schliesst man sie in einen Glascylinder, Fig. 162, ein, den man oben und unten mit einem Deckel von Pappe versieht, welcher mit Stanniol überzogen ist. Der obere Deckel wird mit dem Conductor der Elektrisirmaschine, der untere mit dem Boden in leitende Verbindung gebracht. Wenn dieser Apparat, wie es manchmal vorkommt, während des Versuches aufhört zu wirken, so kommt dieses daher, dass das Glas an seiner Oberfläche ebenfalls elektrisch geworden ist. Nach §. 56 kann dann im Inneren keine elektrische Wirkung mehr eintreten. Entelektrisirt man das Glas über einer Flamme, so beginnt dann der Kugeltanz von Neuem.

Die elektrischen Anziehungs- und Abstossungserscheinungen hat man zu zahllosen Spielereien benutzt, wie das elektrische Glockenspiel, die elektrische Spinne u. s. w., die sich namentlich in älteren Cabinetten finden und deren Beschreibung hier überflüssig ist.

Fig. 162.



Die gegenseitige Abstossung von Körpern, welche mit gleicher Elektricität geladen sind, kann man sehr schön mit Hülfe des Papierbüschels, Fig. 163, zeigen, den man mittelst des Korkes *k* auf den Conductor der Maschine aufsteckt. Auf einem leitenden Stäbchen ist oben ein leitendes Scheibchen befestigt, von dessen Rand eine Reihe 4 bis 6 mm breiter, 30 bis 40 cm langer Streifchen von dünnem Papier herabhängen. Sobald die Maschine gedreht wird, gehen die Streifchen wie ein Schirm aus einander.

Die Haare auf dem Kopfe zeigen eine ähnliche Erscheinung, wenn man sich auf den Isolirschemel, d. h. auf ein durch Glasfüsse getragenes Brett, Fig. 164, stellt und den Conductor der Maschine mit der Hand berührt. Sobald die Maschine gedreht wird, sträuben sich die Haare, sie fallen zusammen, so oft man aus dem Conductor oder dem menschlichen Körper selbst einen Funken zieht.

Wenn man Gummiüberschuhe an hat, ist man ebenso vollständig isolirt, als ob man auf dem Isolirschemel stände.

Der elektrische Funke kann leicht brennbare Körper, z. B. eine eben ausgelöschte Kerze, entzünden. Der schwächste Funken schon, welcher durch Knallgas schlägt, reicht hin, eine Explosion zu bewirken. Um die Entzündung des Knallgases zu zeigen, wendet man die sogenannte elektrische Pistole an, welche Fig. 165 in möglichst einfacher Form dargestellt ist.

Der Pistolenlauf von Blech, welcher durch den Kork an der Mündung verschlossen werden kann, hat rückwärts eine Oeffnung, durch welche mittelst Glas und Kitt isolirt ein Metalldraht bis nahe zur gegenüberstehenden Blechwand geführt ist. Man ladet die Pistole mit einem explosiven Gasgemisch, indem man sie mit abwärts gerichteter Mündung eine Zeit lang über das Entwickelungsrohr eines Wasserstoffapparates, oder über einen Gasbrenner stülpt, so dass sich das einströmende Gas mit einem Theile der zurückgebliebenen Luft vermischt und darauf mit dem Kork verschliesst. Lässt man dann auf den Knopf des Drahtes einen elektrischen Funken fallen, während man den Lauf ableitend berührt, so wird der Kork mit Knall weggeschleudert.

Um Aether zu entzünden, sind schon kräftigere Funken nöthig. Man kann diesen Versuch etwa in folgender Weise anstellen: Unter die

Fig. 163.

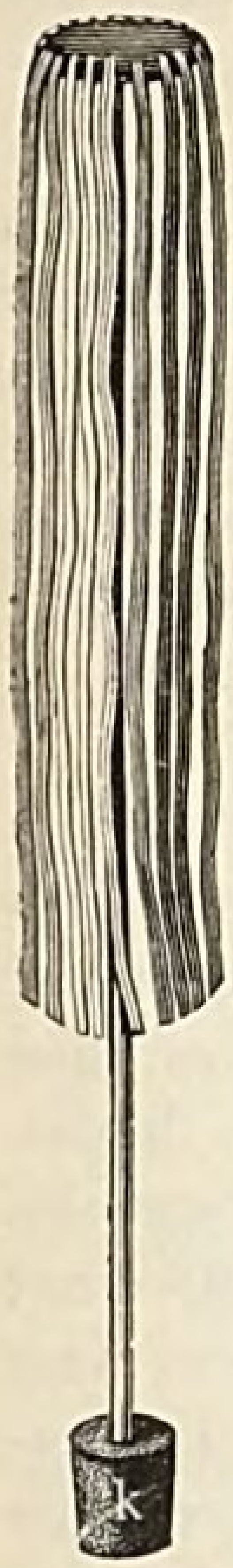


Fig. 164.

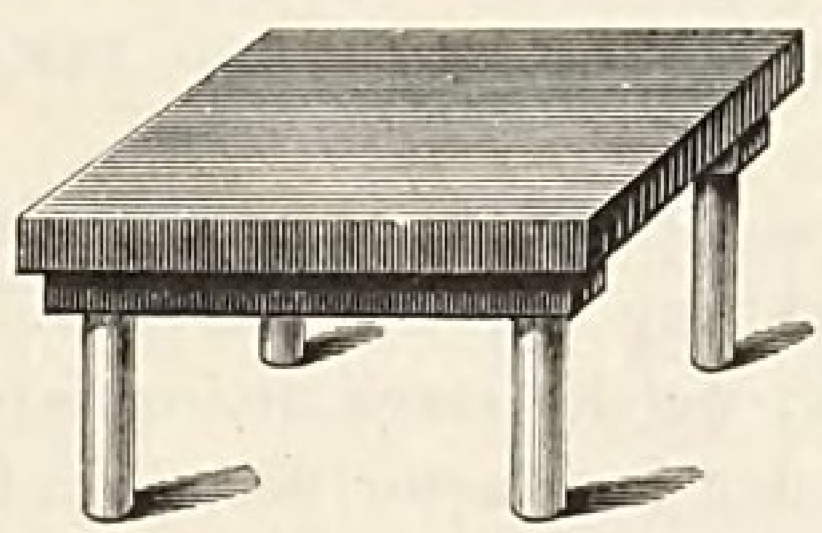


Fig. 166.

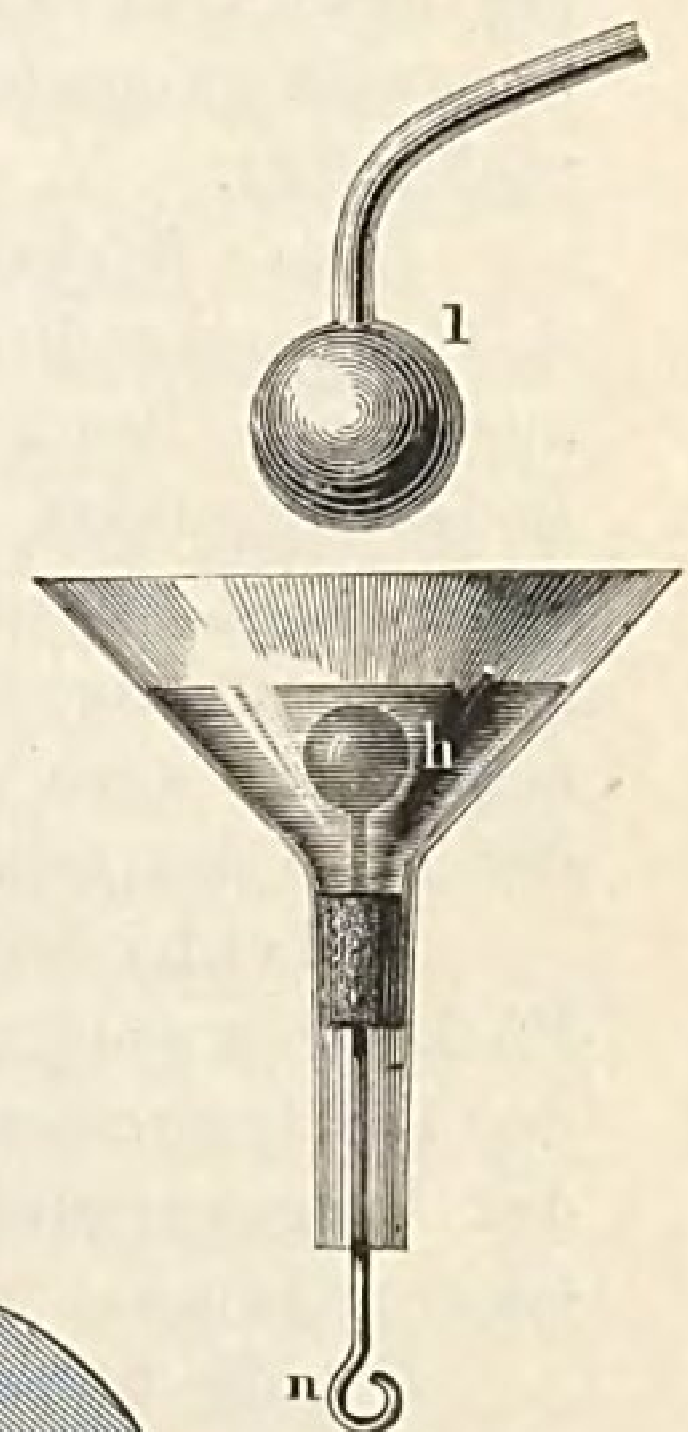
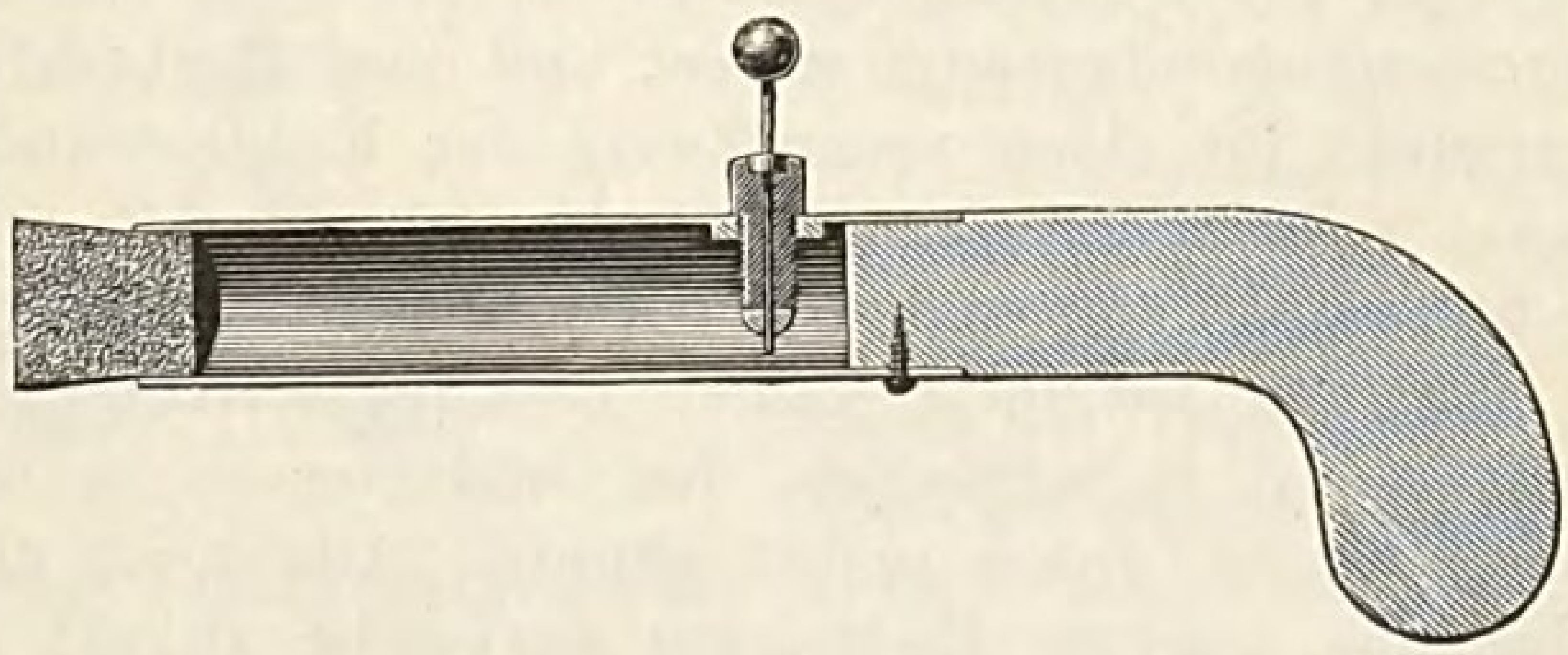


Fig. 165.



Kugel *l*, Fig. 166, welche auf irgend eine Weise in leitender Verbindung mit dem Conductor einer Elektrisirmaschine steht (man kann dazu ohne Weiteres die kleine Kugel verwenden, welche mit dem Conductor *k* der Grüel'schen Maschine, Fig. 143, in Verbindung steht, oder man kann bei der Winter'schen das Röhrchen, Fig. 140, aus dem Conductor ausziehen, und statt dessen ein ungefähr 10 cm langes Messingstäbchen einstecken, welches mit einer Kugel endigt), wird ein Glastrichter in passendem Stativ aufgestellt, dessen Rohr mittelst eines Korkes verschlossen ist. Durch diesen Kork geht ein Messingdraht hindurch, welcher oben die kleinere Messingkugel *h* trägt, unten aber mit einem Haken

endigt. In den Trichter wird zunächst Wasser und darauf so viel Aether gegossen, dass die Kugel *h* eben damit bedeckt ist. Wird nun in den Haken *n* eine ableitende Metallkette eingehängt, so schlagen zwischen *l* und *h* sogleich Funken über, sobald man die Maschine dreht, und diese entzünden dann den Aetherdampf. Leichter gelingt die Entzündung eines mit Aether befeuchteten Baumwollebausches.

Will man diesen Versuch mit Weingeist anstellen, so muss man denselben zuvor erwärmen.

Wir haben gesehen, dass ein in der Nähe des Conductors der Elektrisirmaschine aufgestellter, mit dem Boden in Verbindung stehender Leiter durch Vertheilung elektrisch und mit gebundener Elektricität geladen wird. Sobald nun der Conductor der Maschine durch Ausziehen eines Funkens entladen wird, muss auch eine plötzliche Entladung des vertheilten Leiters erfolgen, welche man mit dem Namen des elektrischen Rückschlages bezeichnet und welche daher rührt, dass die bis dahin gebunden gewesene Elektricität nun rasch in den Boden zurückströmt.

Dieser Rückschlag lässt sich dem Auge mit Hülfe der in Fig. 131, S. 153 dargestellten Vorrichtung sichtbar machen. Zwei an den Leiter angehängte Pendel nämlich, welche stark divergiren, wenn derselbe zum Boden abgeleitet ist und der Conductor der gedrehten Maschine in der Nähe steht, werden jedesmal rasch zusammenfallen, so oft man einen Funken aus dem Conductor zieht. Ein ähnliches Zusammenzucken beobachtet man auch an den Papierstreifen des Apparates Fig. 163, welche in der Nähe des geladenen Conductors stark aus einander gehen.

Galvani beobachtete ähnliche Zuckungen durch den elektrischen Rückschlag an Froschschenkeln, welche in der Nähe des Conductors der Elektrisirmaschine aufgehängt waren, und diese Beobachtung bildet den Ausgangspunkt für einen neuen Zweig der Elektricitätslehre, den Galvanismus, welcher den Gegenstand des folgenden Capitels bildet.

Um die Spitzenwirkung zu demonstriren, dienen folgende Versuche.

Wenn man den Conductor einer Elektrisirmaschine mit einer Spitze versieht, so ist es unmöglich, den Conductor so zu laden, dass man aus ihm kräftige Funken ziehen könnte. Alle durch die Umdrehung der Maschine erzeugte Elektricität entweicht alsbald durch die Spitze.

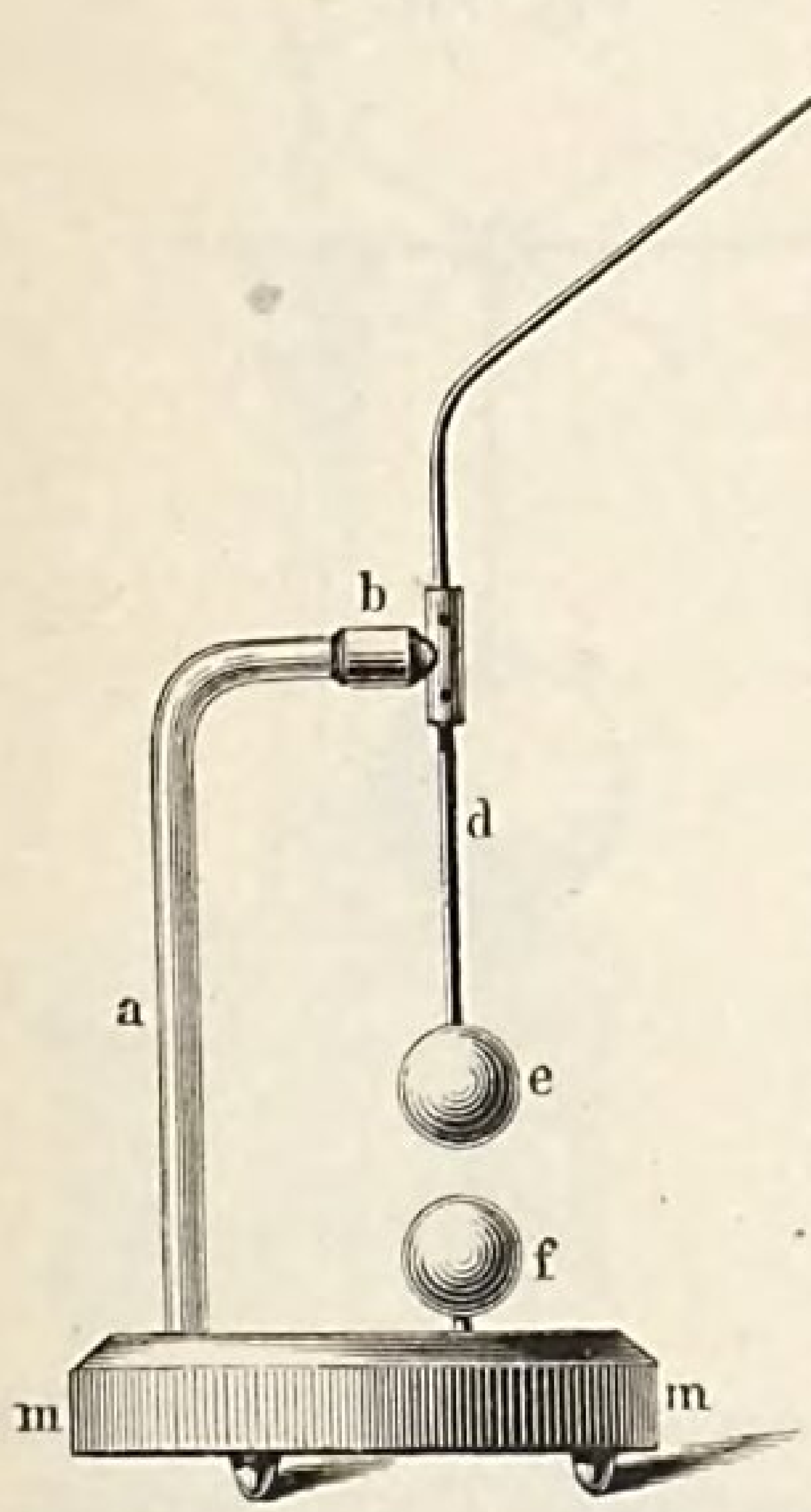
Wenn man eine Spitze, die mit dem Boden in leitender Verbindung steht, dem Conductor der Maschine bis auf einige Decimeter nähert, so ist es gleichfalls unmöglich, ihn zu laden. Die Elektricität des Conductors zerlegt die verbundenen Elektricitäten der Spitze, sie stösst die gleichnamige ab, und zieht die ungleichnamige an; diese ungleichnamige Elektricität häuft sich in der Spitze so stark an, dass sie nach dem Conductor überströmt, um seine Elektricität zu neutralisiren.

Sehr schön lässt sich die elektrische Wirkung der Spitzen durch den Apparat Fig 167 darstellen. Am unteren Ende des oben zugespitzten

Messingdrahtes *c d* ist eine hohle Messingkugel *e* befestigt, welche 2 bis 3 cm Durchmesser hat. Dieser Draht steckt in einer federnden Hülse, welche durch die gläserne Säule *a* getragen wird. In demselben Brettchen, in welchem die Glassäule *a* befestigt ist, steckt auch ein kurzer Messingstift, welcher eine zweite, der oberen gerade gegenüberstehende Metallkugel *f* trägt.

Wird *f* durch Anhängen einer Metallkette mit dem Boden in leitende Verbindung gesetzt, und die Spitze *c* dem Conductor einer in Thätigkeit gesetzten Elektrisirmaschine genähert, so kann man auf demselben keine merkliche Ladung hervorbringen. Schiebt man den Draht *c d* so weit herab, dass die Kugeln *e* und *f* sich berühren, so findet ein continuirliches Wegströmen der vom Conductor abgestossenen Elektricität in den Boden und ein ebenso beständiges Ausströmen der von ihm angezogenen Elektricität aus der Spitze zum Conductor statt. — Sobald man aber den Draht *c d* etwas in die Höhe zieht, so dass ein Zwischenraum zwischen den Kugeln *e* und *f* ist, so findet zwar noch ein beständiges Ausströmen von der Spitze *c* nach dem Conductor statt, die abgestossene Elektricität wird aber in der Kugel *e* angehäuft, bis sie eine hinlängliche Dichtigkeit erlangt, um ein Ueberschlagen von Funken zwischen *e* und *f* zu bewirken. Die Funken folgen um so langsamer, sie sind aber auch um so kräftiger, je weiter die Kugeln *e* und *f* von einander abstehen.

Fig. 167.



Wenn man einer auf dem Conductor der Maschine aufgesetzten Spitze die Hand nähert, während die Maschine gedreht wird, so fühlt man den von der Spitze ausgehenden elektrischen Wind. Man nahm früher an, dass in Folge der grossen Spannung an der Spitze daselbst die Elektricität auf die Lufttheilchen übergehe, welche alsdann von der gleichnamig elektrischen Spitze lebhaft abgestossen werden. Nach den neueren Untersuchungen von R. Nahrwold*) scheint hierbei nicht die Luft selbst, sondern nur der in ihr suspendirte, aus festen oder flüssigen Körpern bestehende Staub elektrisirt zu werden. Nahrwold giebt folgendes einschlägiges Experiment an. Eine tubulirte Glasglocke, Fig. 168 (a. f. S.), von ungefähr 30 cm Höhe und 20 cm Durchmesser wird inwendig mit Glycerin bestrichen und mit dem Tubus nach unten aufgestellt. Ein

*) Wiedem. Ann. Bd. 31, S. 448.

aufgesetzter Blechdeckel, welcher mit der Glycerinschichte und mit der Erde durch *b* in leitender Verbindung steht, lässt durch eine centrale 2 cm weite Oeffnung einen Draht in das Innere der Glocke eingehen, welcher unten mit Nadelspitzen versehen, von dem Deckel isolirt und durch *a* mit dem einen Conductor der Elektrisirmaschine verbunden ist, deren anderer Conductor zur Erde abgeleitet wird. Durch die Glasröhre bei *c* wird dicker Tabaksrauch oder auch Wasserdampf, Salmiakdampf, Russ einer rauchenden Petroleumlampe oder dergleichen eingeführt. Ist so viel Rauch in der Glocke, dass die Nadelspitzen gar nicht mehr sichtbar sind, so genügen einige Umdrehungen der Maschine, um die Glocke wieder klar und durchsichtig zu machen. Die suspendirten Theilchen bleiben auf der Glycerinschichte kleben. Durch Versuche mit einem Elektrometer, den wir hier nicht näher beschreiben können, hat sich Nahrwold überzeugt, dass, nachdem die Staubtheilchen aus der

Fig. 168.

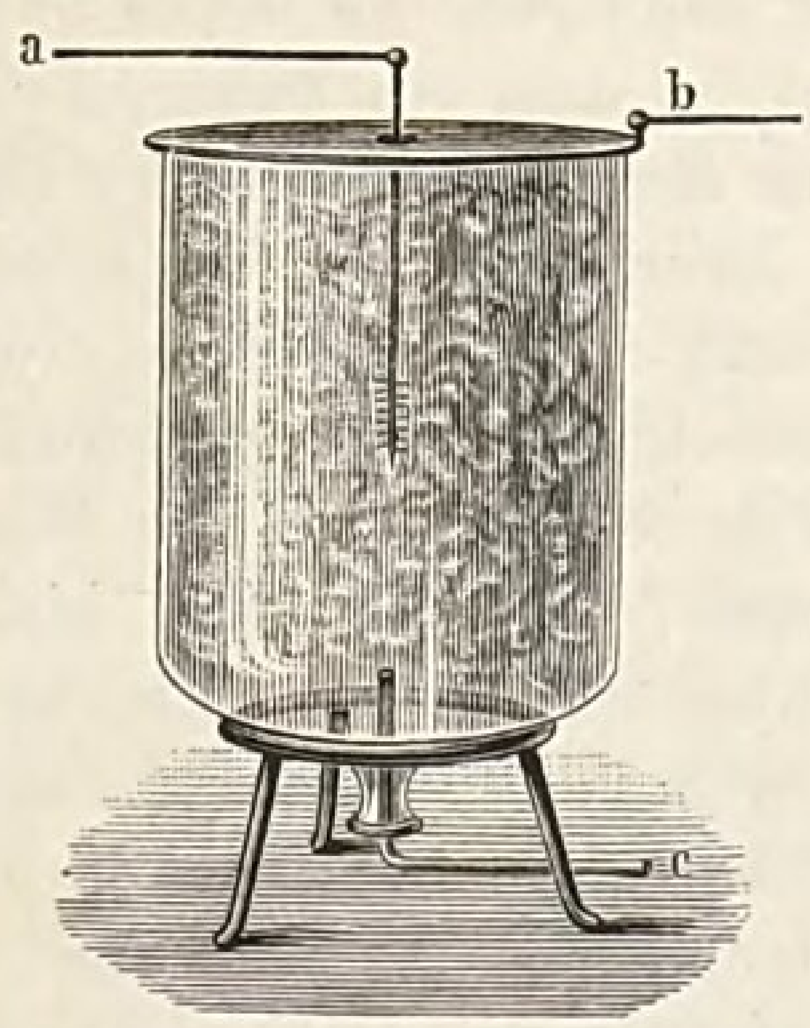
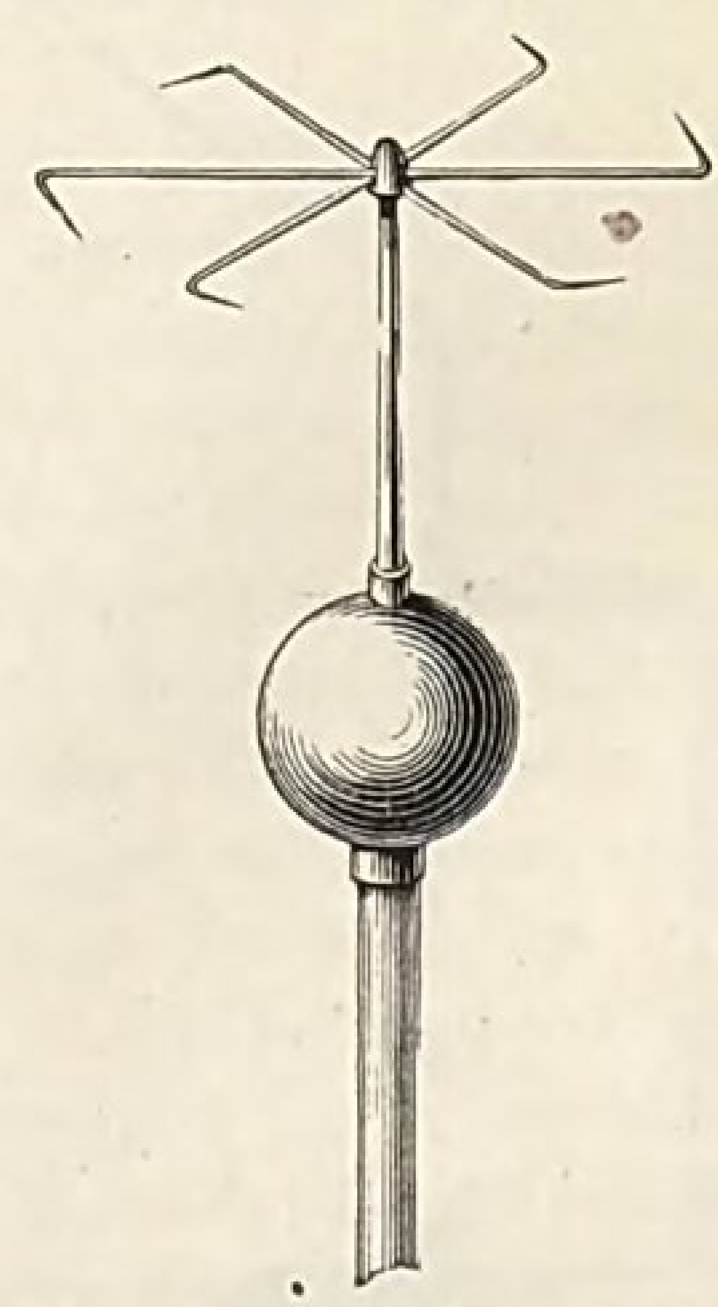


Fig. 169.



Luft vertrieben sind, dieselbe keine oder nur geringe Ladung anzunehmen vermag. Bläst man mittelst eines Blasebalges frische Zimmerluft ein, so nimmt sie sofort wieder elektrische Ladung an, lässt man aber diese Luft durch Baumwolle filtrirt eintreten, wodurch ihr der Staub entzogen wird, so verhält sie sich wieder wie früher und nimmt keine Ladung an.

Man kann den elektrischen Wind dadurch sichtbar machen, dass man der Spitze, von welcher er ausgeht, eine Kerzenflamme nähert.

Wenn die elektrische Spitze selbst beweglich ist, so muss sie sich, vermöge der zwischen ihr und den abströmenden Lufttheilchen stattfindenden Abstossung, selbst bewegen und zwar in einer dem elektrischen Winde entgegengesetzten Richtung. Darauf beruht die Drehung des elektrischen Flugrades, Fig. 169, welche der Rotation des Segner'schen Wasserrades ganz analog ist. Auf eine Stahlspitze, welche mit dem Conductor der Elektrisirmaschine in leitender Verbindung steht, ist ein aus Metalldrähten gebildetes, leicht in horizontaler Ebene um-

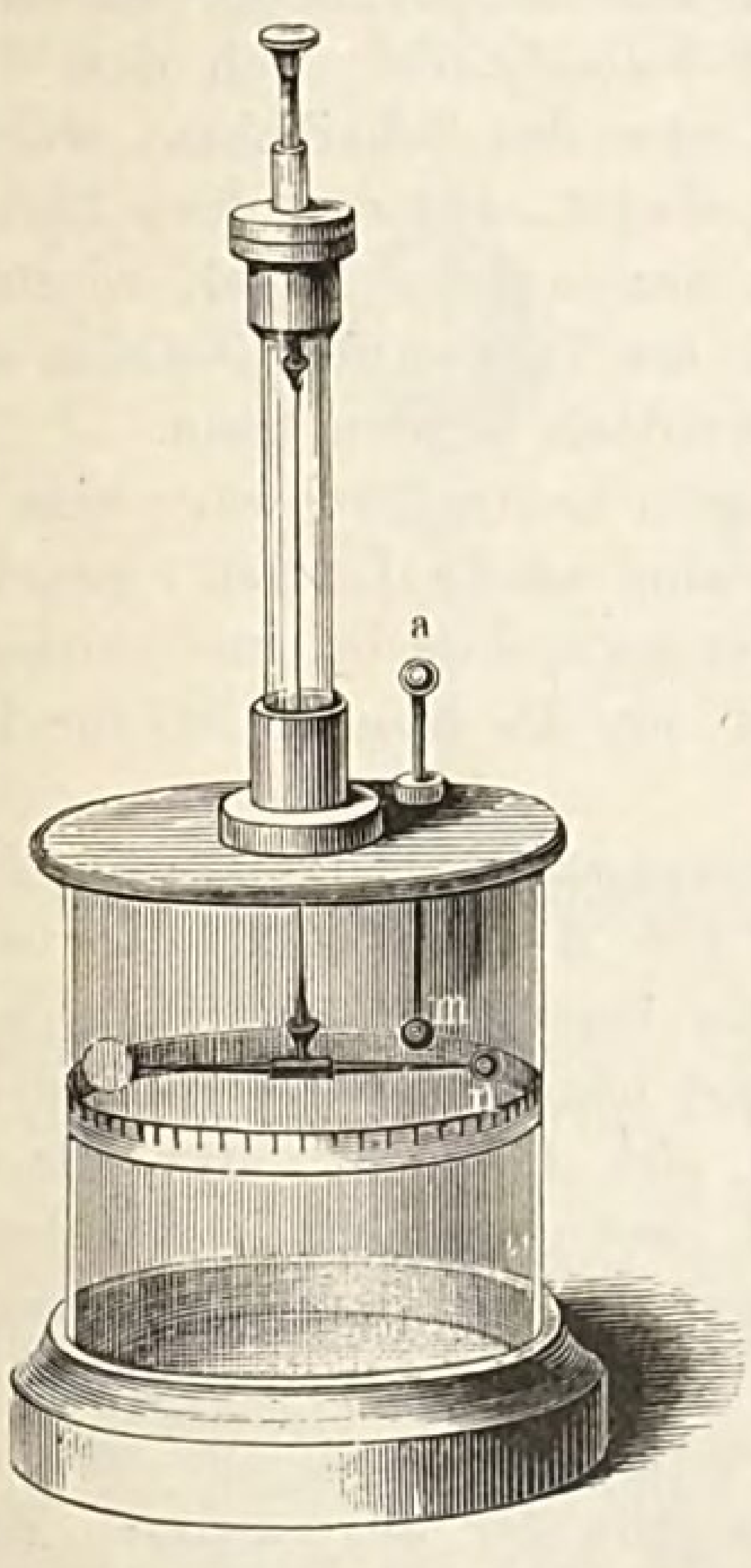
drehbares Rädchen aufgesetzt. Die zugespitzten Enden der Drähte sind, von der Mitte aus gesehen, alle nach derselben Richtung umgebogen. Sobald die Maschine gedreht wird, beginnt das Flugrad zu rotiren, und zwar in solcher Richtung, dass die Spitzen zurückweichen.

Coulomb's Gesetz; Nachweis desselben durch Experimente und theoretische Folgerungen. 64 Befinden sich zwei Elektricitätsmengen e und e' im Abstande r, so wirken sie auf einander mit der Kraft

$$f = \frac{e\,e'}{r^2},$$

dabei wird die Kraft f positiv gerechnet, wenn die Elektricitäten gleichnamig sind, sich also abstossen. Dieses Gesetz, welches besagt, dass die elektrischen Anziehungen und Abstossungen sich verhalten wie die Producte der Elektricitätsmengen und umgekehrt wie das Quadrat der Entfernung, ist wie das entsprechende Gesetz für die magnetischen Kräfte von Coulomb 1785 aufgestellt und bewiesen worden.

Fig. 170.



Er wandte hier ganz ähnliche Mittel an, wie dort, nämlich die Drehwage und die Oscillationen einer kleinen elektrischen Nadel.

Man kann die Drehwage in der schon auf S. 56 beschriebenen Gestalt auch zu elektrischen Versuchen anwenden, für welche jedoch die Form Fig. 170 weit geeigneter ist. Vor Allem muss man dafür sorgen, dass alle Wände möglichst gut isoliren. Der gleichfalls gut isolirende Deckel hat zwei Löcher, eines in der Mitte, über welchem die Röhre sich erhebt, und ein anderes auf der Seite, um die elektrisirten Körper in den Apparat hineinzubringen. Der Torsionskreis am oberen Theile der Röhre ist gerade so eingerichtet, wie zu den magnetischen Versuchen. Der Silber- oder Messingfaden, welcher in dem Rohre herunterhängt, trägt an seinem unteren Ende eine leichte Nadel von Schellack, die sehr gut äquilibrirt sein muss, und an einem Ende ein Kügelchen von Hollundermark oder ein Scheibchen von Blattgold trägt, welches 13 bis 17 mm im Durchmesser hat. Auf den Boden setzt man, um die Luft im Inneren trocken zu erhalten, ein Schälchen, in welchem sich einige Stücke Chlorcalcium befinden.

In Betreff der Verbesserungen, welche Riess noch an der Drehwage angebracht hat, um den Messungen mit derselben grössere Genauigkeit und Bequemlichkeit zu sichern, müssen wir auf dessen Werk: „Die Lehre von der Reibungselektricität“ verweisen.

Um mit diesem Apparate die verkehrte Proportionalität der elektrischen Abstossung mit dem Quadrat der Distanz zu beweisen, ertheilt man der Scheibe oder dem Kügelchen der horizontalen Schellacknadel eine Ladung und bringt dann ein mit derselben Elektricität geladenes Scheibchen oder Kügelchen, welches am unteren Ende eines vertical gehaltenen Schellackstäbchens befestigt ist, wie Fig. 170 zeigt, in den Apparat. Der Torsionskreis muss anfänglich so gestellt sein, dass, bevor ein elektrisirter Körper in den Apparat gebracht wird, das eine Ende der horizontalen Schellacknadel, welches das Scheibchen oder Kügelchen trägt, an der Stelle sich befindet, welche nachher das untere Ende des von oben eingeschobenen Schellackstabes einnimmt. Bei dieser Stellung ist die horizontale Schellacknadel nach dem Nullpunkte der Theilung gerichtet. Sobald nun das Scheibchen, welches unten am verticalen Schellackstabe sich befindet, mit derselben Elektricität geladen ist, wie das Scheibchen der horizontalen Nadel, so findet eine Abstossung statt, deren Stärke durch die Torsion des Drahtes nach den in §. 24 besprochenen Grundsätzen ermittelt werden kann.

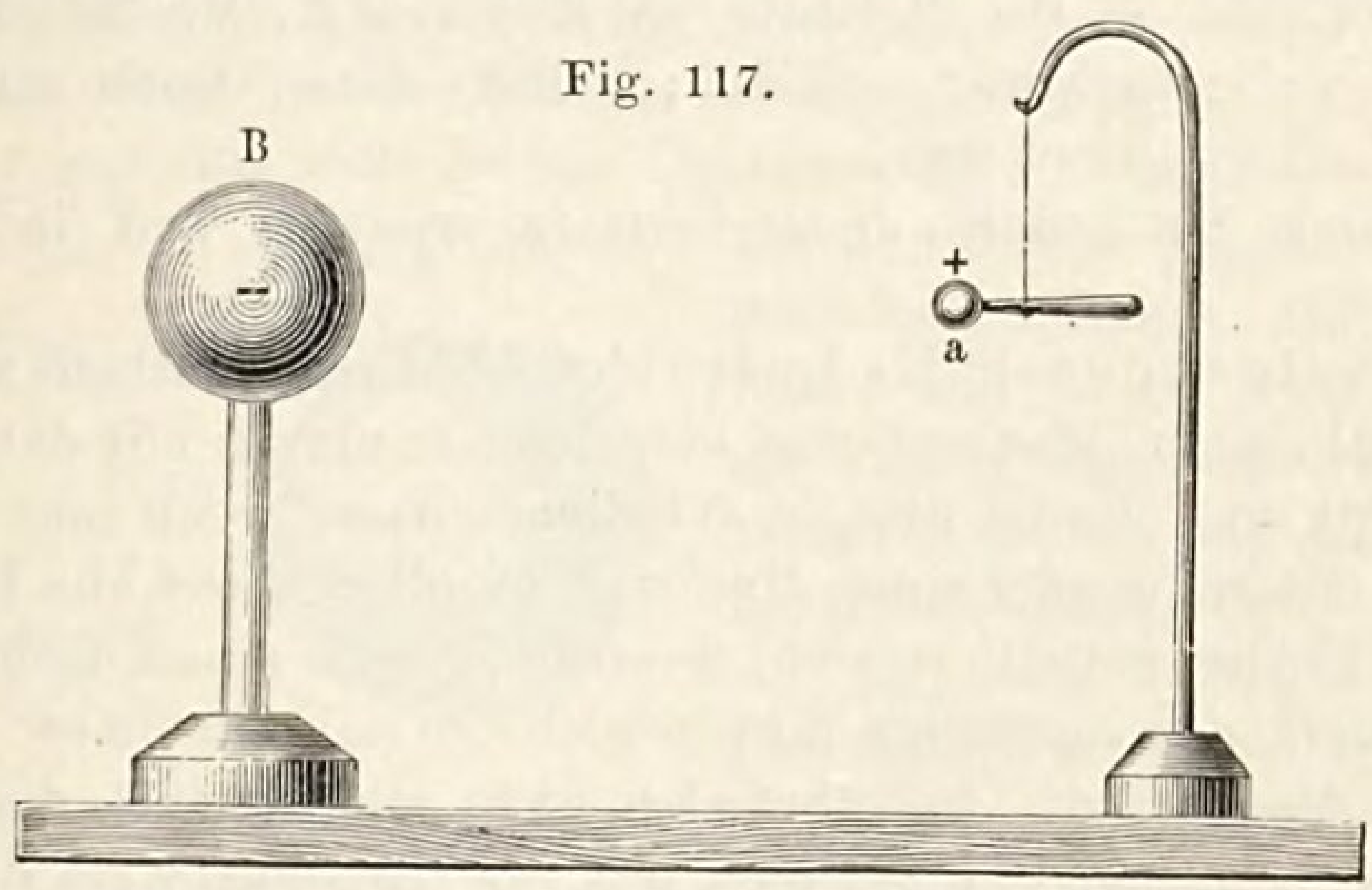
Hat man den sich abstossenden Kugeln in der Drehwage eine bestimmte Ladung ertheilt und dem Drahte eine solche Torsion t gegeben, dass ihre Entfernung gleich r ist, so findet man, dass bei unveränderter Ladung eine Torsion $4t$, $9t$ etc. nöthig ist, um die Kugeln auf die Entfernung $\frac{1}{2}r$, $\frac{1}{3}r$ etc. zu nähern.

Um zu beweisen, dass die elektrischen Abstossungen sich verhalten wie das Product der Mengen der aufeinander wirkenden Elektricitäten, muss man ein Princip anwenden, welches schon für sich selbst einleuchtend ist: dass nämlich auf zwei leitenden, isolirten und vollkommen gleichen Kugeln sich die Elektricität, die sich auf ihnen befindet, ganz gleich vertheilt, wenn man sie in Berührung bringt. Wäre z. B. vor der Berührung nur die eine der beiden Kugeln elektrisirt gewesen, die andere nicht, so wird bei der Berührung die erstere die Hälfte ihrer E an die andere verlieren. Nachdem man nun zuerst die Torsionskraft bestimmt hat, welche der abstossenden Kraft zwischen der Kugel der horizontalen Nadel und der des eingeschobenen Stabes für eine bestimmte Entfernung das Gleichgewicht hält, berührt man die Kugel des Stabes mit einer vollkommen gleichen, auf dieselbe Weise isolirten, nicht elektrischen Kugel. Die auf diese Weise berührte Kugel verliert die Hälfte ihrer Elektricität, und um nun wieder gleiche Ablenkung der horizontalen Nadel zu erhalten, darf die Torsion des Fadens nur halb so gross sein, als vor der Berührung. Nimmt man auf dieselbe Weise der einen Kugel wieder die Hälfte ihrer Elektricität, so wird die abstossende Kraft abermals um die Hälfte vermindert etc.

Nimmt man zu gleicher Zeit jeder der beiden Kugeln in der Drehwage die Hälfte ihrer Elektricität, so ist die Wirkung zwischen beiden viermal schwächer als vorher.

Das Gesetz, nach welchem die elektrische Anziehung und Abstossung bei wachsender Entfernung der auf einander wirkenden elektrischen Körper abnimmt, hat Coulomb auch durch die Oscillationen eines elektrischen Pendels in folgender Weise ermittelt. Er liess eine kleine Nadel von Schellack, die an einem Seidenfaden horizontal aufgehängt war und welche an ihrem Ende eine kleine metallene Hohlkugel a, Fig. 171 trug, unter dem Einflusse einer isolirten Kugel B oscilliren, nachdem man sowohl der Kugel B als auch der kleinen Kugel a eine elektrische Ladung mitgetheilt hatte. Sind a und B mit entgegengesetzten Elektricitäten geladen, so nimmt das Schellackstäbchen mit der Kugel a die in Fig. 171 angedeutete Stellung ein, sind aber a und B mit derselben Elektricität geladen, so wird das Schellackstäbchen eine solche Stellung

Fig. 117.



einnehmen, dass a das von B abgewendete Ende desselben bildet. Etwas aus seiner Gleichgewichtslage in horizontaler Ebene entfernt, wird nun das kleine horizontale Pendel um seine verticale Axe oscilliren, und aus der Schwingungsdauer kann man auf die Intensität der Wirkung schliessen, welche die Elektricität, mit welcher B geladen ist, auf diejenige ausübt, welche a enthält.

Bezeichnen wir nun mit t die Schwingungsdauer des kleinen elektrischen Pendels für eine bestimmte Entfernung der beiden Kugeln, so wird man bei gleicher Ladung die Schwingungsdauer nahe gleich $2t$, $3t \ldots nt$ finden, wenn der Abstand der beiden Kugeln 2 mal, 3 mal n mal so gross ist.

Nun aber ist die Schwingungsdauer irgend eines Pendels stets der Quadratwurzel aus der beschleunigenden Kraft, welche es treibt, umgekehrt proportional, wir haben also:

$$t : n t = \sqrt{\frac{1}{v}} : \sqrt{\frac{1}{v'}},$$

wenn wir mit v die beschleunigende Kraft bezeichnen, welche auf das kleine Pendel bei einfachem und mit v' diejenige, welche auf dasselbe bei dem nfachen Abstande der Kugeln a und B wirkt. Aus obiger Gleichung ergiebt sich aber

$$v' = \frac{v}{n^2}.$$

Die Intensität der elektrischen Wirkung zwischen den beiden Kugeln a und B nimmt also in demselben Verhältnisse ab, in welchem das Quadrat ihrer Entfernung wächst, oder wie man es gewöhnlich kurz ausdrückt: sie verhält sich umgekehrt wie das Quadrat der Entfernung.

Bei den Versuchen von Coulomb sind mehrere Umstände vorhanden, welche dieselben erschweren und deren Genauigkeit beeinträchtigen. Insbesondere sind es die Verluste an Elektricität, welche die Kugeln während der Beobachtung erleiden; selbst dann, wenn sie nur von trockener Luft umgeben sind.

Coulomb hat jedoch diese Verluste ermittelt und in Rechnung gebracht.

Der Verlust durch die Luft rührt wohl grösstentheils von dem in der Luft enthaltenen Wasserdampf her, denn er nimmt mit der Feuchtigkeit der Luft zu. Es ist dies so auffallend, dass, wenn man über eine elektrische Glasröhre oder einen Harzstab hinbläst, diese alle Elektricität verlieren. Ebenso verhält es sich, wenn man nach einem isolirten Leiter bläst, nur darf man natürlich diesem nicht zu nahe kommen, weil sonst ein Funken überspringt. Es rührt aber nicht aller Verlust, den ein elektrisirter Körper in der Luft erleidet, nur von der Gegenwart des Wasserdampfes her, denn selbst in einer Luft, welche durch Chlorcalcium vollständig getrocknet ist, findet ein solcher Verlust statt, wie die Versuche mit der Drehwage zeigen.

Wie gross dieser Verlust ist, lässt sich durch den Versuch leicht ermitteln. Nachdem z. B. den beiden Kügelchen der Drehwage eine solche Ladung ertheilt worden war, dass es einer Drehung des oberen Mikrometers von 250^0 bedurfte, um die Kügelchen in einem Abstand von 20^0 zu erhalten, betrug also ursprünglich die Torsionskraft, welche der abstossenden Kraft das Gleichgewicht hielt, $250 + 20 = 270^0$. Nach und nach näherten sich aber die Kügelchen; man musste nach einer Minute die Torsion um 6^0 vermindern, um die Entfernung von 20^0 wieder zu erhalten. In einer Minute war also der Verlust an Elektricität entsprechend einer Torsion von 6^0. Zu Anfang der Minute war die elektrische Kraft gleich einer Torsion von 270^0, am Ende derselben gleich 264^0; die mittlere elektrische Kraft während dieser Minute war also

$$\frac{270 + 264}{2} = 267^0.$$

In einer Minute betrug also der Verlust $^6/_{267}$ oder $^1/_{44}$ der mittleren elektrischen Kraft.

Hat man dies ermittelt, so kann man aus der beobachteten Kraftwirkung auf jene schliessen, welche eine Anzahl Minuten früher stattgefunden hat oder später stattfinden wird.

Der sicherste Beweis für die Richtigkeit des Coulomb'schen Gesetzes folgt jedoch daraus, dass sich aus demselben die Thatsache des ausschliesslichen Sitzes der Elektricität auf der äusseren Oberfläche der Körper als mathematische Folgerung ergiebt. Da wir diesen Nachweis mittelst der hier verfügbaren mathematischen Hülfsmittel nicht für beliebig geformte Oberflächen führen können, so wollen wir uns darauf beschränken, dies für eine Kugel zu thun.

Durch den Punkt m, welcher sich irgendwo im Inneren einer dünnwandigen Hohlkugel, Fig. 172, befindet, seien zwei Sehnen aA und bB gelegt. Die Bogenstücke ab und AB seien so klein, dass wir sie mit den Geraden ab und AB verwechseln dürfen. Nach einem bekannten geometrischen Satze sind dann die Dreiecke abm und ABm ähnlich. Nun denken wir uns diese beiden Dreiecke als die Durchschnitte durch die Axe zweier Kegel, welche ihre gemeinschaftliche Spitze in m haben und an der Kugeloberfläche die schiefliegenden elliptischen Grundflächen ab und AB, Fig. 173, herausschneiden.

Fig. 172.

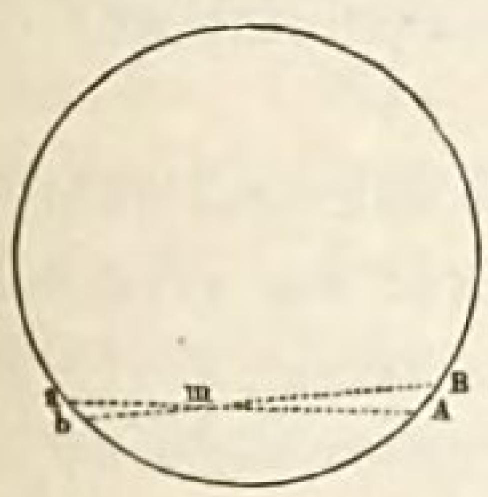
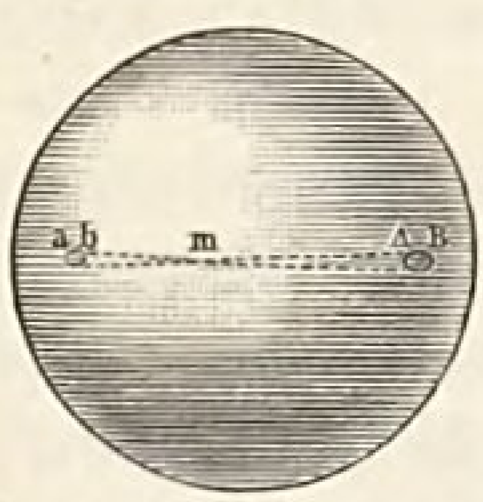


Fig. 173.



Da diese beiden Kegel ebenfalls ähnlich sind und bei ähnlichen Körpern sich die homologen Flächen verhalten wie die Quadrate der homologen Seiten, so verhalten sich auch diese Flächenelemente ab und AB wie die Quadrate ihrer mittleren Abstände vom Punkte m. Nennen wir diese Flächenelemente f und F, ihre mittleren Abstände von m, r und R, so gilt also

$$f : F = r^2 : R^2.$$

Wird eine solche Hohlkugel geladen, so muss sich die Elektricität gleichförmig auf der Oberfläche vertheilen. Die auf den Flächenelementen f und F vorhandenen Elektricitätsmengen e und E verhalten sich demnach wie $f : F$, also auch

$$e : E = r^2 : R^2,$$

woraus

$$\frac{e}{r^2} = \frac{E}{R^2}$$

folgt. Diese Ausdrücke sind aber zugleich die Ausdrücke für die Kräfte, welche von den Flächenelementen auf den Punkt m ausgeübt würden, wenn derselbe die Elektricität 1 besitzen würde. Daraus folgt, dass dieser Punkt, wenn er elektrisch wäre, zwischen den Flächen ab und AB

im Gleichgewichte stände, dass er gar keine Kraftwirkung erfahren würde. Und da wir dieselbe Betrachtung auf alle solche einander gegenüberstehenden Flächenelemente der Kugeloberfläche ausdehnen könnten, so folgt, dass überhaupt auf einen Punkt im Inneren einer Hohlkugel von der auf der Oberfläche derselben befindlichen Elektricität keine Kraftwirkung ausgeübt wird.

Befinden sich daher im Inneren einer massiven Kugel irgendwo zwei oder mehrere Elektricitätstheilchen, so unterliegen dieselben ausschliesslich ihrer gegenseitigen Abstossung, welche so lange andauern wird, bis alle Elektricität an die Oberfläche gewandert ist.

Fehlt an der Hohlkugel ein Theil ihrer Oberfläche, hat dieselbe z. B. eine Oeffnung, so fehlen an dieser Stelle auch die Flächenelemente, welche den gegenüberstehenden das Gleichgewicht halten sollen. In diesem Falle kann natürlich das Gesetz von der ausschliesslichen Anordnung auf der äusseren Oberfläche nicht mehr ganz strenge gelten. Denkt man sich die Oeffnung in der Hohlkugel allmälig weiter werdend, so geht die letztere allmälig in die Form einer oben offenen Schale, dann in die einer flachen Schale, eines Tellers und zuletzt in die einer ebenen Platte über. Die letztere ist auf beiden Seiten gleich elektrisch, die flache Schale hat schon die überwiegende Menge der Elektricität auf der convexen Seite.

Je mehr wir uns dem Extrem der geschlossenen Hohlkugel nähern, desto mehr verschwindet der letzte Rest von Ladung auf der concaven Oberfläche. Sind die Oeffnungen in der Hohlkugel symmetrisch vertheilt, so dass im Allgemeinen jeder Oeffnung eine gleiche gegenüberliegt, so wirkt eine solche Hülle auf das Innere fast ebenso wie eine geschlossene Hohlkugel. Eine Hohlkugel aus Drahtgeflecht z. B. kann eine ganz geschlossene in ihrer Wirkung auf das Innere ersetzen.

Wie oben erwähnt, kann der in Rede stehende Satz auf geschlossene Hüllen jeder beliebigen Form erweitert werden. Denken wir uns an einer Kugel eine Seite zu einer eiförmigen Spitze erweitert, so ist klar, dass die Wirkung der daselbst befindlichen Flächenelemente auf einen Punkt im Inneren gegenüber den anderen zurücktreten würde, da ihre Entfernung grösser wird. Soll das Gleichgewicht fortbestehen, so muss an diesen vorspringenden Stellen die Elektricität zu grösserer Dichte angesammelt werden, um die grössere Entfernung zu compensiren.

65 **Absolutes elektrostatisches Maass der Elektricitätsmengen.** Wir haben bisher von Elektricitätsmengen gesprochen, ohne ein bestimmtes Maass derselben zu benutzen. Dass es möglich sein muss, von einer gegebenen Elektricitätsmenge Bruchtheile bestimmter relativer Grösse zu erhalten, beruht auf der unmittelbar einleuchtenden Erwägung, dass zwischen zwei gleichgestalteten und einander symmetrisch berührenden Leitern die Elektricität sich gleich vertheilen müsse, weil eben gar kein Grund für eine einseitige Bevorzugung vorhanden ist.

Man kann also z. B. die Elektricität einer Kugel in Hälften theilen, indem man sie mit einer zweiten gleichen Kugel berührt. Durch Fortsetzung dieses Verfahrens erhält man zunächst die relativen Mengen 1, $^1/_2$, $^1/_4$, $^1/_8$... Durch gegenseitige Berührung einer Kugel mit der Ladung $^1/_2$ und einer gleichen mit der Ladung $^1/_4$ bekommt man dann auf jeder derselben eine relative Menge $^3/_8$ u. s. w. Dagegen wäre es z. B. nicht möglich, einem Leiter durch öftere Berührung mit derselben Probekugel an derselben Stelle jedesmal dieselbe Elektricitätsmenge zu entziehen, da jede neu entzogene Menge immer nur derselbe aliquote Theil des Restes sein würde.

Wohl aber gelingt es, wie schon Faraday gezeigt hat, Elektricitätsmengen, welche auf mehreren getrennten Leitern vorhanden sind, auf einem Leiter zu addiren. Dieser letztere Leiter muss ein Hohlkörper sein, in dessen Inneres die anderen Leiter isolirt einzuführen sind, deren Elektricitäten dann sofort auf die äussere Oberfläche des Hohlkörpers übergehen, so dass die eingeführten elektrischen Leiter unelektrisch herausgezogen werden können. Die in Fig. 124 und 125 abgebildeten Apparate könnten hierzu dienen.

Die Elektricität ist also jedenfalls ein quantitativ messbares Agens. Es handelt sich nur noch darum, eine passende Maasseinheit dafür aufzustellen. Wie in allen übrigen Fällen, so hat man auch hier eine Maasseinheit gewählt, welche zu den Fundamentaleinheiten der Länge, Masse und Zeit in einfacher Beziehung steht. Es ist dies auf zweifache Weise geschehen, indem man einerseits die Fernwirkung ruhender, im im Gleichgewicht befindender Elektricität, andererseits die Wirkung der strömenden Elektricität benutzt hat. Wir haben zunächst nur mit dem ersteren, dem elektrostatischen Maasse zu thun.

Das Coulomb'sche Gesetz der elektrischen Fernwirkung, welches besagt, dass die Elektricitätsmengen e und e' sich im Abstande r mit einer Kraft f abstossen, welche dem Ausdrucke $\frac{e\,e'}{r^2}$ proportional ist, geht für den Fall gleicher Massen über in die Form:

$$f = k\,\frac{e^2}{r^2},$$

wo k eine Constante bedeutet, welche von der Wahl der Einheiten für f und e und r abhängt. Misst man r nach Centimetern, f nach Dynen und setzt $k = 1$, so erhält man für die Elektricitätsmenge ein absolutes Maass nach dem Centimeter-Gramm-Secundensystem.

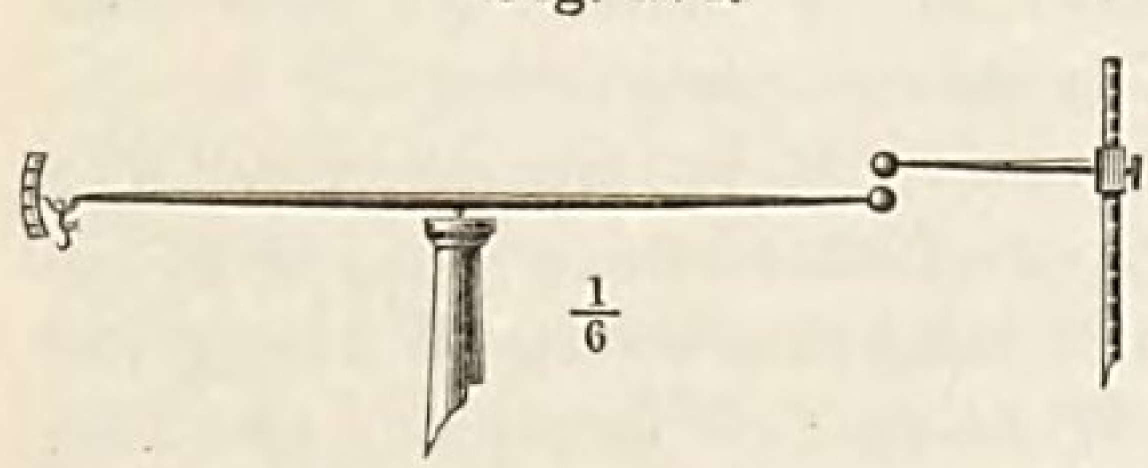
Elektrostatische Einheit der Elektricitätsmenge ist jene, welche eine ihr gleiche Menge in 1 cm Abstand mit der Kraft einer Dyne abstösst, d. h. mit einer Kraft, welche der Masse eines Gramms in der Secunde einen Geschwindigkeitszuwachs von 1 cm ertheilen würde. Um diese Einheit zu bezeichnen, wollen wir künftig schreiben: Elektricitätseinheit $(c g s)$, während wir für die später zu bespre-

chende elektromagnetische zum Unterschiede die grossen Buchstaben (CGS) benutzen wollen.

Wie wir schon an anderer Stelle erörtert haben, wird eine Masse gleich 1 g von der Erde mit der Kraft von 981 Dynen angezogen, die Kraft einer Dyne ist daher gleich dem Zug der Erde auf eine Masse von $\frac{1}{981} = 0{,}00102\,\mathrm{g} = 1{,}02\,\mathrm{mg}$.

Wollen wir also eine solche Elektricitätseinheit experimentell darstellen, so könnten wir folgendermaassen verfahren: Ein sehr leichter, aus isolirendem Materiale hergestellter Wagebalken, Fig. 174, trägt am einen Ende eine sehr kleine Kugel mit leitender Oberfläche, welche durch Gegengewichte am anderen Ende des Balkens genau äquilibrirt ist, so dass der Index am Gradbogen auf Null zeigt. Eine zweite gleiche Kugel wird senkrecht über der ersten an einem isolirten Halter so aufgestellt, dass die Mittelpunkte beider Kugeln 1 cm von einander abstehen. Elektrisirt man dann beide Kugeln, während sie in Berührung gebracht sind, so erhalten sie gleiche Elektricitätsmengen und wird die untere von der oberen abgestossen. Durch am anderen Ende hinzugehängte Gewichtshaken kann aber der Balken in die ursprüngliche Lage zurückgebracht werden. Sobald das hierzu nöthige Gewicht 1,02 mg beträgt, enthält jede Kugel eine absolute elektrostatische Einheit der Elektricitätsmenge (cgs).

Fig. 174.



Gegen diese Darstellung wäre noch der Einwand zu erheben, dass die Kugeln in Folge ihrer im Verhältniss zu den Dimensionen grossen Annäherung auf einander bereits sehr merkliche Influenz ausüben und dadurch das Distanzgesetz stören. Um diesem Fehler auszuweichen, kann man die Definition dahin formuliren, Einheit der Elektricitätsmenge sei jene, welche eine ihr gleiche Menge im Abstande r mit der Kraft $\frac{1}{r^2}$ abstösst.

Eine Hollundermarkkugel von 0,7 cm Durchmesser wiegt 0,0102 g und wird demnach von der Erde mit der Kraft von $981 \times 0{,}0102 = 10$ Dynen angezogen. Hängt man zwei solcher Kugeln an zwei 50 cm lange Coconfäden und ladet sie so stark, dass sie sich bis auf 10 cm Distanz abstossen, so enthält jede der beiden Kugeln 10 absolute elektrostatische Einheiten*).

*) Man findet zunächst aus dem Radius = 50 und der halben Sehne = 5 den Sinus des Ausschlagswinkels α jedes Pendels = 0,1, daraus den Ausschlagswinkel $\alpha = 5^0\,44'$, den Winkel zwischen den Pendeln $2\alpha = 11^0\,28'$. Die verticale Kraft = 10 wirkt in der Richtung der Sehne mit der Kraft $f = 10 \,.\, sin\,\alpha\; cos\,\alpha = \frac{10\; sin\; 2\,\alpha}{2} = 1$. Aus $\frac{e^2}{10^2} = 1$ folgt dann $e = 10$. Weiter unten werden wir noch zweckmässigere Anordnungen beschreiben.

Die elektrostatische Einheit der Elektricität ist demnach eine sehr kleine Elektricitätsmenge; durch einmaliges Reiben einer Siegellackstange werden leicht mehrere Hunderte solcher Einheiten entwickelt.

Potential einer Kugel; Wirkung der oberflächlichen Elektricität auf das Innere, Wirkung einer inneren Elektricitätsmenge auf die Oberfläche und nach aussen. Absolute Einheit des Potentials. 66 Nach Coulomb's Entdeckung folgt die Fernwirkung zwischen zwei elektrischen Punkten, für welche wir uns elektrisirte kleine Kugeln denken können, demselben Gesetze, wie die Fernwirkung zweier Magnetpole. Daraus folgt, dass wir Alles das, was wir in den §§. 27 bis 32 über die Fernwirkung magnetischer Kraftcentra vorgetragen haben, direct auf die Fernwirkung elektrischer Kraftcentra übertragen können.

Ist also irgendwo fern von influenzirenden Leitern eine verschwindend kleine Kugel mit der Elektricität $+E$ geladen und nähern wir derselben aus unendlicher Entfernung eine zweite elektrische Kugel mit der Ladung $+1$ bis auf einen Punkt im Abstande r, so ist dazu eine Arbeitsleistung $= \frac{E}{r}$ erforderlich, welche man das Potential der elektrischen Masse $+E$ auf den betreffenden Punkt (oder in dem betreffenden Punkte) nennt *). Dieselbe Arbeit wird von der positiven Elektricitätseinheit wiederum geleistet, wenn dieselbe in unendliche Entfernung oder auf die Erde abfliesst. Die Erdoberfläche ist nämlich ein Reservoir von so grossem Fassungsvermögen für die Elektricität, dass alle künstlich erzeugten Elektricitätsmengen, auf die Erdoberfläche ausgebreitet, nicht im Stande sind, deren Potential merklich zu erhöhen. Zudem kommen auf der Erde immer wieder gleiche Mengen der entgegengesetzten Elektricitäten zum Ausgleiche. Abfliessen auf die Erde ist also als gleichbedeutend mit „Entfernung ins Unendliche" zu nehmen.

Nun denken wir uns eine elektrisirte hohle oder massive Kugel vom Radius r, auf deren Oberfläche eine Elektricitätsmenge E, nach absoluten Einheiten gemessen, ausgebreitet sei und fragen, wie gross das Potential V sein wird, welches diese Ladung im Mittelpunkte der Kugel hervorbringen wird **).

Zur Beantwortung denken wir uns die Oberfläche der Kugel in zahlreiche kleine Flächenelemente zerlegt, welche mit den entsprechenden Elektricitätsmengen $e_1 + e_2 + e_3 + \cdots = E$ versehen sind. Für jede einzelne solche Menge, z. B. e_1, ist das Potential $= \frac{e_1}{r}\cdot$ Das Potential

*) Die vollständige Bezeichnung würde sein: Potential zwischen der Masse $+E$ und der im Abstande r befindlichen Masse $+1$.

**) Das heisst: Das Potential zwischen der Masse E auf der Oberfläche und der Masse $+1$ im Mittelpunkte.

der ganzen Menge E beträgt daher im Mittelpunkte die Summe der einzelnen Potentiale, also:

$$V = \frac{e_1}{r} + \frac{e_2}{r} + \frac{e_3}{r} + \dots = \frac{E}{r}.$$

Nun lässt sich aber leicht einsehen, dass dieser Werth des Potentials auch für alle anderen Punkte im Inneren der Kugel gilt. Denn aus der Thatsache, dass die oberflächliche Elektricität auf keinen elektrischen Punkt im Inneren eine Kraftwirkung ausübt, folgt, dass auch keine Arbeit geleistet wird, wenn man im Inneren eines Körpers eine elektrische Masse verschiebt. Eine kleinere isolirte Kugel z. B. könnte im Inneren einer Hohlkugel hin und her bewegt werden, ohne anderen Aufwand an Arbeit, als Reibung und Schwere erfordern.

Ob man also ein Elektricitätsquantum von unendlicher Ferne oder von der Erde aus auf die Oberfläche einer Hohlkugel oder auf irgend einen Punkt des Inneren bringt, das ist in Bezug auf die aufgewendete Arbeit ganz gleichwerthig. Dasselbe gilt aber auch für Hohlkörper irgend einer Form. Es kann daher auch das Potential eines solchen Körpers auf seiner Oberfläche, sowie das Potential auf einen Punkt seiner Umgebung keine Aenderung erfahren, wenn man ein Elektricitätsquantum im Inneren desselben verschiebt oder auf die Oberfläche übergehen lässt. Wir können dies auf folgende Weise experimentell nachweisen:

1. Versuch. Wir entfernen aus dem Metallkäfig der Fig. 127 das innere Elektroskop und die Zuführungsvorrichtung an der Oeffnung und constatiren zunächst am äusseren Elektroskop, dass das Potential des Käfigs = 0 ist. Hierauf versenken wir eine an einem Coconfaden gehaltene stark geladene Kugel durch die obere Oeffnung ins Innere des Käfigs mit der Vorsicht, die Ränder der Oeffnung nicht zu berühren, damit die Elektricität nicht von der Kugel an den Käfig übergehen kann. Sollte dies Schwierigkeiten machen, so kann man auch eine grössere Kugel mit einem Metallstiel, an dessen Ende der Seidenfaden geknüpft ist, von unten nach oben durch die Oeffnung durchstecken und dann erst auf den hervorragenden Stiel die Elektricität übertragen, worauf derselbe ins Innere versenkt wird. Man bemerkt sofort, dass die Goldblättchen divergiren, dass mithin der Käfig ein Potential erhalten hat, obwohl er selbst keine Elektricität aufgenommen hat. Senkt oder hebt man nun die Kugel an dem Seidenfaden, oder lässt sie hin und her pendeln, so ändert sich der Ausschlag am Elektroskop nicht. Er ändert sich aber auch nicht, wenn man die Kugel so weit niedersenkt, dass sie ihre Elektricität an den Teller und von da an die Aussenseite des Käfigs abgiebt. Das Potential bleibt also ungeändert.

2. Versuch. Man versenkt wie vorhin eine beispielsweise positiv geladene Kugel in den Käfig, berührt aber dann den letzteren ableitend, so dass er wiederum auf das Potential Null gelangt. Hebt man dann die

Kugel wieder heraus, so nimmt jetzt der Käfig ein negatives Potential an. Die Erklärung ist naheliegend. Die eingeführte Kugel rief negative Influenzelektricität an der Innenseite, positive Influenzelektricität an der Aussenseite hervor. Während das positive Potential der Kugel und das negative der Innenseite sich nach aussen hin neutralisirten, kam das gleich grosse positive der Aussenseite zur Wirkung. Bei der Berührung verschwindet das letztere. Sobald man nun die Kugel heraushebt, verschwindet mit ihr auch ihr positives Potential und es muss das der negativen Elektricität der Innenseite, welche jetzt nach aussen wandert, zurückbleiben.

3. Versuch. Man giebt von Anfang an dem Käfig irgend ein Potential und führt dann die elektrisirte Kugel ein. Man erhält dann stets an der Aussenseite die algebraische Summe der Potentiale des Käfigs und der Kugel, welche sich auch nicht ändert, wenn die Kugel mit der Innenseite in Berührung tritt. Diese Versuche stammen von Faraday, der sie mit zerlegbaren hohlen Metallgefässen anstellte.

Wäre die Elektricitätsmenge E in einem Punkte concentrirt, so würde auf jedem Punkte, der um r von jenem Punkte absteht, also auch auf jedem Punkte der Oberfläche einer Kugel vom Radius r, das Potential den Werth $\frac{E}{r}$, also genau denselben Werth haben, wie die Elektricität auf der Oberfläche selbst hervorbringt. Dies lässt uns einsehen, dass in Bezug auf die Wirkung nach aussen die elektrische Kugeloberfläche ersetzt werden könnte durch ihren gleichstark elektrisirten Mittelpunkt. Dieser Satz ist auch streng mathematisch und zwar zuerst für die Schwerkraft von Newton bewiesen worden. Wir können dies auch so ausdrücken, dass wir sagen, die elektrischen Kraftlinien gehen von der elektrischen Oberfläche mit der Ladung E in derselben Richtung und Anzahl nach aussen, als ob sie von einem im Mittelpunkte der Kugel befindlichen mit E geladenen Punkte ausgingen und die Oberfläche nach aussen durchsetzen würden. In Wirklichkeit befinden sich im Inneren der Kugel keine Kraftlinien, weil dort keine Kraft herrscht. Die Analogie, welche hierbei zwischen den Kraftlinien und den Lichtstrahlen stattfindet, welche von einem virtuellen Bilde auszugehen scheinen, hat Veranlassung gegeben, in diesem Falle den Kugelmittelpunkt als das elektrische Bild der elektrischen Oberfläche zu bezeichnen. In anderen Fällen sind solche elektrische Bilder nicht punktförmig.

Aus Obigem folgt auch, dass zwei elektrisirte Kugeln, so lange ihre Influenzwirkung vernachlässigt werden kann, auf einander wirken, wie wenn ihre Elektricitäten in ihren Mittelpunkten concentrirt wären, dass demnach bei Rechnungen nach dem Coulomb'schen Gesetze nicht die Abstände der Kugeloberflächen, sondern der Kugelmitten einzusetzen sind.

Fassen wir die Hauptergebnisse dieses Paragraphen zusammen, so erhalten wir folgende Sätze:

I. Das Potential der Elektricität auf der Oberfläche eines Körpers auf einen Punkt der Oberfläche ist ebenso gross, wie auf irgend einen Punkt des Inneren.

II. Das Potential einer Elektricitätsmenge im Inneren eines Körpers auf einen Punkt ausserhalb desselben ist ebenso gross, wie wenn diese Elektricitätsmenge auf der Oberfläche vertheilt wäre.

III. Das Potential der Elektricität auf der Oberfläche einer Kugel auf einen Punkt ihrer Oberfläche oder ihres Inneren ist gleich der Elektricitätsmenge dividirt durch ihren Radius.

IV. Das Potential der Elektricität einer Kugel auf irgend einen Punkt ausserhalb derselben ist gleich der Elektricitätsmenge dividirt durch den Abstand des betreffenden Punktes vom Mittelpunkte der Kugel.

Aus dem Satze III. ergiebt sich, dass das Potential auf der Oberfläche und im Inneren einer Kugel vom Radius 1 cm, welche mit der Einheit der positiven Elektricität geladen ist, gleich Eins ist. Daraus folgt noch folgende Definition für die absolute Einheit des Potentials.

Das Potential Eins hat eine Kugel vom Radius 1 cm, welche eine ihr gleiche und gleichgeladene Kugel im Abstande von r Centimeter mit der Kraft von $\frac{1}{r^2}$ Dynen abstösst.

67 **Potential einer Elektricitätsmenge auf sich selbst; Potentielle Energie einer elektrischen Ladung.** Werden zwei von einander unendlich entfernte kleine Kugeln, welche mit den Elektricitätsmengen E und E' geladen sind, einander bis zum Abstande ihrer Mittelpunkte R genähert, so ist dazu ein Arbeitsaufwand

$$V = \frac{EE'}{R}$$

erforderlich, welchen wir das Potential der Elektricitätsmengen E und E' auf einander nennen. Dieses Potential stellt aber offenbar noch nicht den ganzen Arbeitsaufwand vor, der zur Hervorbringung oder Concentration der Elektricitätsmengen E und E' im Abstande R erforderlich ist. Denn die Menge E besteht selbst schon aus E Einheiten, welche auf der einen Kugel concentrirt werden mussten, ebenso die Menge E' aus E' solcher Einheiten. Was wir im §. 66 als Potential einer mit $+ E$ geladenen Kugel definirt haben, ist die Arbeit, welche nöthig ist, um eine Elektricitätseinheit aus unendlicher Ferne, oder von der Erde auf die Kugel zu bringen, wobei E gegen 1 so gross gedacht wird, dass das Potential durch die Zufuhr von $+1$ nicht merklich erhöht wird. Etwas anderes ist die Frage, wie gross die Arbeit ist, um die Elektricitätsmenge E auf eine noch gar nicht geladene Kugel zu bringen.

Stellen wir uns vor, die Menge E werde in lauter Einheiten zerlegt und jede derselben einzeln auf die Kugel gebracht, so sehen wir ein, dass die erste Einheit am wenigsten Arbeit erfordert, die zweite schon

mehr, die letzte am meisten. Wir wollen auch hier die Analogie mit der Hydrostatik heranziehen, um diesen Sachverhalt klar zu übersehen und den betreffenden Arbeitsaufwand berechnen zu lernen. Am Ufer des Meeres sei ein Gefäss mit senkrechten Wänden aufgestellt, dessen Basis mit dem Meeresspiegel in gleichem Niveau steht und welches mit einer Niveauhöhenscala versehen ist. Um dieses Gefäss bis zur Höhe 1 zu füllen, sei eine Masse Wasser $= C$ erforderlich. C ist also die Capacität des Gefässes pro Höheneinheit. Soll dieses Gefäss bis zur Höhe V gefüllt werden, so ist dazu eine Wassermasse $= E = V\,C$ erforderlich. Es wird nun gefragt, wie viel Arbeitsaufwand dazu gehört. Dabei mögen die Höhen nach Metern, die Massen nach Litern (Kilogrammen), die Arbeit nach Kilogrammmetern gemessen werden.

Obwohl auch hier die Arbeitsleistung bei der Hebung der einzelnen Liter Wasser verschieden gross ist, da jedes folgende höher zu heben ist als die vorhergehenden, so ist es doch leicht, die Gesammtarbeit direct zu berechnen, indem man erwägt, dass der Schwerpunkt der ganzen Wassermasse E auf die Höhe $\frac{V}{2}$ gehoben wird. Die Arbeit A wird daher im Ganzen betragen:

$$A = \tfrac{1}{2}\,E\,V = \tfrac{1}{2}\,C\,V^2.$$

Ganz dieselbe Beziehung gilt für die Elektricitätsmenge E, welche auf einem Leiter bis zur Potentialhöhe V aufgehäuft werden soll. Man nennt die Grösse A das Potential der Elektricität E auf sich selbst. Es ist dieselbe identisch mit der potentiellen Energie, welche in einem mit der Menge E bis zur Höhe V geladenen Leiter aufgespeichert ist, so wie mit der Arbeit, welche die Elektricität E leisten kann, indem sie wieder auf die Erde mit dem Potential Null abfliesst.

Wir haben früher als „Potential“ schlechthin, oder als „Potential einer Elektricitätsmenge auf einen Punkt“ die Arbeit bezeichnet, welche aufzuwenden ist, um die positive Elektricitätseinheit aus unendlicher Ferne oder von der Erde auf den betreffenden Punkt zu bringen. Diese Definition gilt aber nur, insofern durch diese Zuführung das Potential nicht merklich geändert wird. Es ist dies derselbe Sachverhalt, wie wenn wir die Höhe des Wassers in obigem Gefässe durch die Arbeit definiren, welche wir brauchen, um 1 Liter Wasser mehr einzufüllen. Strenge genommen messen wir damit immer das Mittel der Höhen vor und nach diesem Einfüllen.

Um eine Kugel vom Radius 1 bis zum Potential 1 zu laden, brauchen wir nach §. 66 die Elektricitätsmenge $+1$, die Arbeit hierzu beträgt aber nur eine halbe Einheit, denn nur der allerletzte Antheil der zugeführten Elektricität steigt auf die Potentialhöhe 1, die mittlere Hebung der ganzen Menge beträgt nur $\tfrac{1}{2}$. Dies ist zu beachten, damit man durch jene Definition des Potentials nicht irregeführt werde.

Um ein System von zwei Kugeln, deren Radien r und r' sind, und deren Mittelpunkte um die Distanz R von einander abstehen, mit den

Elektricitätsmengen E und E' zu laden, ist daher eine Gesammtarbeit erforderlich, welche sich aus drei Theilen zusammensetzt. Es sind dies die beiden „Potentiale auf sich selbst" $\frac{1}{2}\frac{E^2}{r}$ und $\frac{1}{2}\frac{E'^2}{r'}$ und das Potential von E auf E' gleich $\frac{EE'}{R}$. Dabei ist noch vorausgesetzt, dass die gegenseitige Influenz unmerklich sei. Rücken die beiden Kugeln ins Unendliche aus einander, so wird der letztere Antheil der aufgespeicherten potentiellen Energie wieder verbraucht, leitet man die erste Kugel allein zur Erde ab, so verschwinden der erste und der letzte Antheil und bleibt nur die Energie $\frac{1}{2}\frac{E'^2}{r'}$ aufgespeichert.

68 Die elektrische Capacität und deren absolutes Maass.

Die Erörterungen der vorigen Paragraphen führen uns zur Aufstellung des Begriffes des elektrischen Fassungsvermögens oder der Capacität C eines Leiters*). So wie die Menge des Wassers, welche man in ein Gefäss einfüllen muss, um eine bestimmte Niveauhöhe zu erreichen, vom Fassungsvermögen des Gefässes abhängt, und ebenso, wie die Quantität Wärme, die man der Masseneinheit eines Körpers zuführen muss, um seine Temperatur um einen Grad zu steigern, von seiner Wärmecapacität abhängt, ebenso hängt die Quantität Elektricität, die man einem Leiter zuführen muss, um ihn auf ein bestimmtes Potential zu bringen, von einer Eigenschaft desselben ab, die man analog seine elektrische Capacität nennt.

Die elektrische Capacität eines Leiters wird gemessen durch die Menge der Elektricität, die man braucht, um den Leiter vom Potential Null auf das Potential 1 zu bringen. Bezeichnen wir demnach diese Capacität mit C, so ist

$$C = \frac{E}{V} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

Aus dem oben Vorgetragenen folgt für eine Kugel vom Radius r, welche aller Influenzwirkung entzogen ist, dass ihr Potential

$$V = \frac{E}{r},$$

folglich ihre Capacität

$$C = \frac{E}{\frac{E}{r}} = r \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

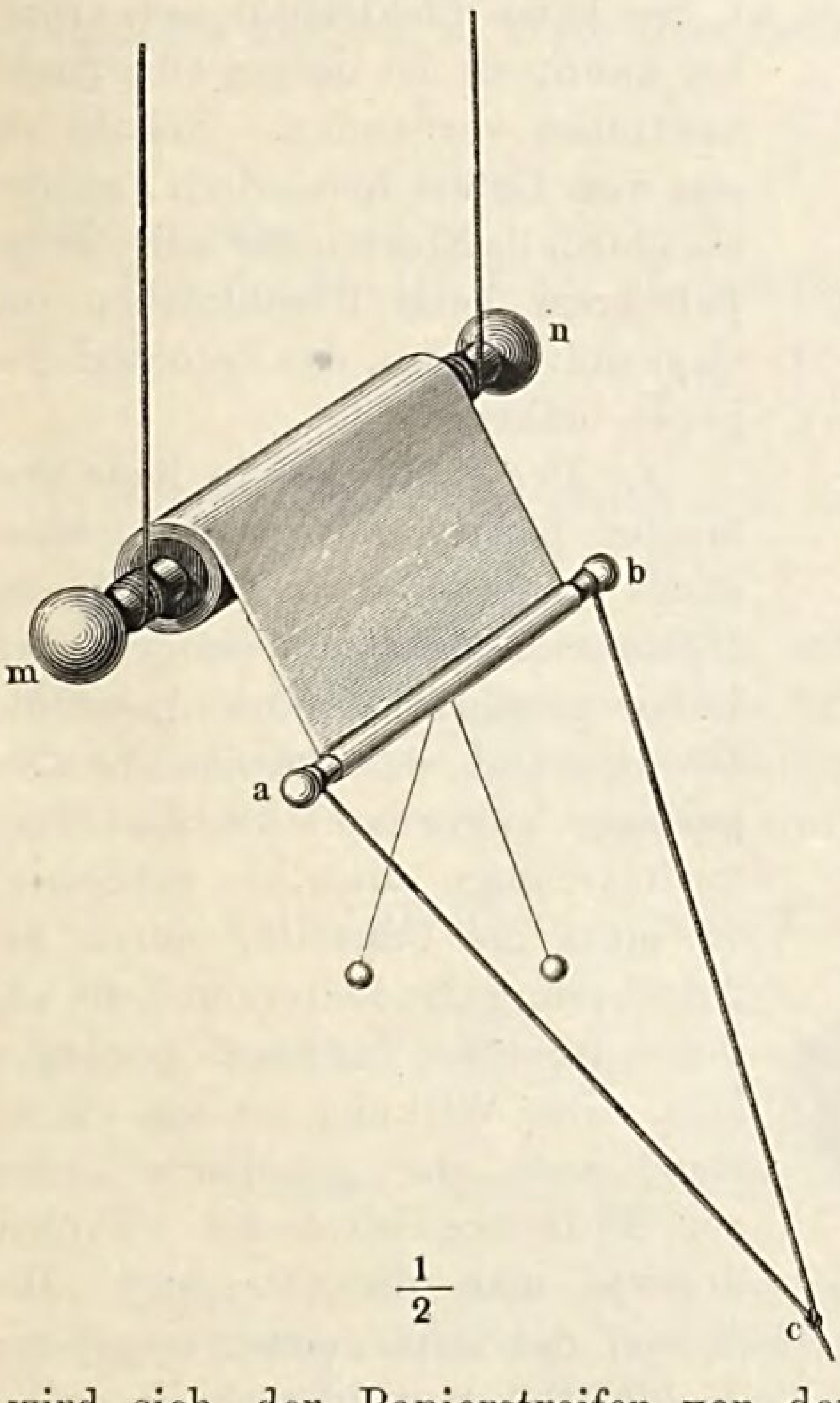
sei.

*) Da wir den Begriff der Capacität bei der Theorie der Influenzmaschine benöthigten, haben wir bereits im §. 52 eine vorläufige Erläuterung desselben gegeben.

Die Capacität einer Kugel ist also durch dieselbe Zahl gegeben, wie ihr Radius. Dabei wird dieselbe im cm.-gr.-sec.-System nach Centimetern gemessen. Auch dieses Maass ist als elektrostatisches von einem später zu definirenden zu unterscheiden.

Während die Wärmecapacität des Körpers eine Constante ist, welche nur von dem materiellen Inhalt derselben abhängt und bei Aenderungen der Lage, Gestalt, Oberflächengrösse der Körper unverändert bleibt, verhält sich dies bei der elektrischen Capacität eines Leiters ganz anders. Diese ist vom materiellen Inhalt ganz unabhängig, dagegen abhängig von Grösse, Gestalt und sogar von der Lage gegen andere Leiter, falls dieselben Influenz ausüben können. Folgende Experimente zeigen, wie man die Capacität eines Leiters durch Abänderung dieser Umstände vergrössern oder verkleinern und dadurch — bei gleich bleibender Ladung — das Potential verkleinern oder vergrössern kann.

Fig. 175.



$\frac{1}{2}$

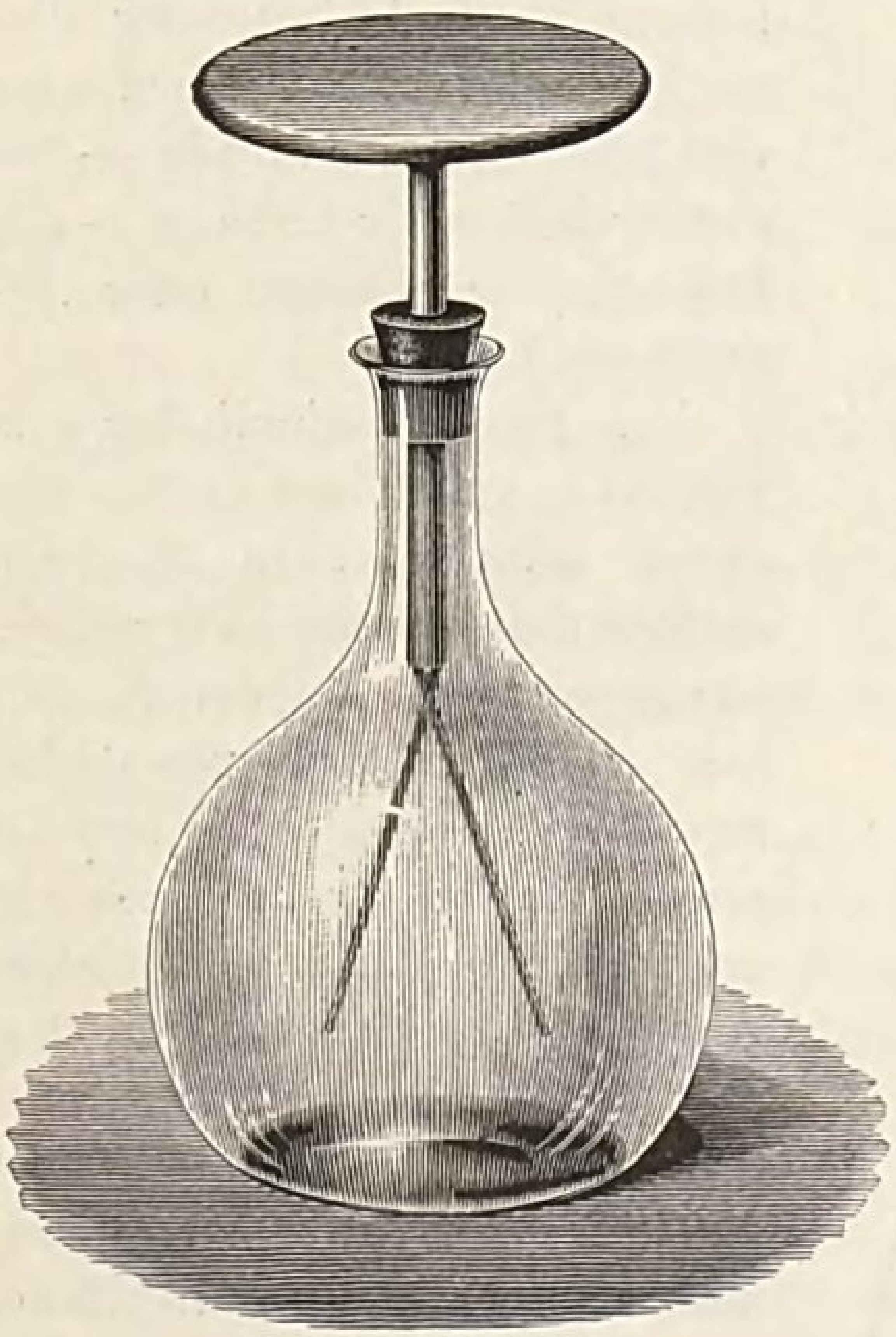
1. Ein Metallcylinder $m\,n$, Fig. 175, auf beiden Seiten mit etwas dünneren, in Knöpfen endigenden Fortsätzen versehen, hängt an zwei seidenen Schnüren. Auf den mittleren dickeren Theil dieses Cylinders ist seiner ganzen Breite nach ein ungefähr 30 cm langer Streifen von Goldpapier aufgeklebt, dessen freies Ende an ein Glasstäbchen $a\,b$ befestigt ist. Dieser Goldpapierstreifen ist mehrmals um den Metallcylinder herumgewickelt. Zieht man an den Schnüren $c\,a$ und $c\,b$, so wird sich der Papierstreifen von dem Cylinder abwickeln, während dadurch gleichzeitig die Schnüre, an denen der Cylinder hängt, aufgewunden werden, wodurch der Cylinder selbst gehoben wird. Lässt man bei c wieder nach, so sinkt der Metallcylinder von selbst durch sein Gewicht herab, wodurch dann der Goldpapierstreifen wieder aufgewickelt wird.

In der Mitte von $a\,b$ hängt ein elektrisches Pendelpaar, Hollundermarkkügelchen, an leinenen Fäden. Ist das Goldpapier ganz auf den Messingcylinder aufgewickelt, so werden die Pendel divergiren, wenn man dem Apparat eine elektrische Ladung ertheilt. Zieht man jetzt bei c,

so dass der Streifen abgewickelt wird, so vermindert sich die Divergenz der Pendel, weil das Potential in Folge der grösser gewordenen Capacität gesunken ist. Lässt man *c* nach, so verkleinert sich die Oberfläche und die Capacität und vergrössert sich das Potential; die Pendel divergiren wiederum stärker.

2. Man setzt auf die Platte des Elektroskops, Fig. 176, einen metallenen Becher und versenkt in denselben ein etwa $^1/_2$ m langes Metallkettchen, das man am oberen Ende mittelst Seidenfadens isolirt halten kann. Ist das Elektroskop geladen, so vergrössert sich der Ausschlag, sobald man das Kettchen in das Gefäss niedersinken lässt, er verkleinert sich, sobald man das Kettchen emporzieht. Da am Kettchen, so lange es innerhalb des Gefässes ist, fast keine Elektricität sich erhalten kann, so ist dessen Oberfläche wie nicht vorhanden. Sobald sie aus dem Gefäss heraustritt, nimmt sie ebenfalls Elektricität auf. Folglich muss beim Herausziehen die Capacität steigen, das Potential dagegen sinken.

Fig. 176.



3. Der Platte des in Rede stehenden positiv geladenen Elektroskops werde eine nicht elektrische Platte oder überhaupt ein grösserer Leiter genähert. Sofort nimmt die Divergenz ab, das Potential ist also geringer geworden. Da die Elektricitätsmenge dieselbe geblieben, so muss die Capacität durch die Annäherung des Leiters und die auf ihn ausgeübte Influenz gestiegen sein. Die Wirkung ist am stärksten, wenn der genäherte Leiter zur Erde abgeleitet ist. Früher drückte man dies so aus: Die positive Elektricität werde zum Theil von der influenzirten negativen gebunden und könne deshalb auf die Goldblättchen nicht mehr in voller Stärke wirken. Diese Ausdrucksweise führt aber leicht zu Missverständnissen und entbehrt der wissenschaftlichen Strenge. Wir werden von dieser Methode, die Capacität eines Leiters durch Näherung eines zweiten zur Erde abgeleiteten zu vergrössern, bald wichtige Anwendungen kennen lernen.

69 **Beziehungen zwischen Potential, Spannung und Dichte.** Unter der Dichte der Elektricität verstehen wir nach §. 57 die auf der Oberflächeneinheit vorhandene Elektricitätsmenge oder, was

dasselbe bedeutet, das Verhältniss zwischen Elektricitätsmenge und Oberfläche.

Auf einer Kugel vom Radius r, deren Oberfläche demnach $= 4\pi r^2$ ist, und welche mit der Elektricitätsmenge E geladen wurde, beträgt die Dichte D überall

$$D = \frac{E}{4\pi r^2}.$$

Unter Spannung F der Elektricität wollen wir die Kraft verstehen, mit welcher eine Einheit der Elektricitätsmenge von der Oberfläche weg abgestossen wird. Da die Elektricität E auf der Oberfläche gerade so wirkt, als wäre sie im Mittelpunkte concentrirt, wo sie um r von der Oberfläche absteht, so muss diese Spannung durch die Grösse

$$F = \frac{E}{r^2}$$

gegeben sein.

Das Potential V ist, wie mehrfach erörtert wurde, gegeben durch

$$V = \frac{E}{r}.$$

Die Capacität ist gleich dem Radius, also

$$C = r.$$

Durch Substitution erhalten wir demnach folgende Zusammenstellung der Beziehungen zwischen Potential, Spannung und Dichte auf der Oberfläche einer Kugel vom Radius (der Capacität) $= r$, welche mit der Elektricitätsmenge E geladen wurde:

$$\text{Potential} \quad V = \frac{E}{r} = rF = \sqrt{EF} = 4\pi r D \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

$$\text{Spannung} \quad F = \frac{E}{r^2} = \frac{V}{r} = \frac{V^2}{E} = 4\pi D \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

$$\text{Dichte} \quad D = \frac{E}{4\pi r^2} = \frac{V}{4\pi r} = \frac{V^2}{4\pi E} = \frac{F}{4\pi} \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

Daraus folgt, dass bei unverändertem Radius, also auf Kugeln gleicher Grösse, Potential, Spannung und Dichte einander einfach und direct proportional sind, so dass man in diesem Falle, soweit es sich nur um relative Werthe handelt, diese Begriffe für einander setzen kann.

Denkt man sich aber die Kugel grösser werdend, z. B. wie eine Seifenblase bis zum doppelten Radius aufgeblasen, so wird die Capacität doppelt so gross, das Potential $1/2$ mal so gross, die Spannung und die Dichte $1/4$ mal so gross als früher.

Bei gleicher Ladung verhält sich also die Capacität einer Kugel direct wie der Radius, das Potential verkehrt wie der Radius, Spannung und Dichte verkehrt wie das Quadrat des Radius. Denkt man sich die Kugel deformirt, z. B. eiförmig ausgezogen oder scheibenförmig abgeplattet,

so ändern sich alle diese Grössen, aber nur Capacität und Potential haben einen für den ganzen Leiter gültigen Werth. Spannung und Dichte nehmen an verschiedenen Stellen verschiedene locale Werthe an, welche desto grösser werden, je kleiner der Krümmungshalbmesser der betreffenden Stelle ist.

Nähert man einer positiv geladenen Kugel einen isolirten, nicht geladenen Leiter, so dass Influenz stattfindet, so *vermindert* sich ihr *Potential* und *vergrössert* sich ihre *Capacität*, die *Dichte* und *Spannung nehmen* an der dem Leiter *zugekehrten* Seite zu, an der *entgegengesetzten* ab.

Aus diesen Beispielen ersieht man, wie verschiedene Begriffe das Potential, die Dichte, sowie die Spannung sind.

Für die Frage des Gleichgewichts oder der Bewegung der Elektricität auf in Verbindung gesetzten Leitern ist einzig und allein die Potentialdifferenz und nicht die Differenz der Spannungen oder Dichten entscheidend. Es können z. B. zwei Leiter dieselbe Dichte und dieselbe Spannung haben und trotzdem, wenn man sie durch einen Draht verbindet, Elektricität von dem einen auf den anderen übergehen.

Als ein solches Beispiel betrachten wir zwei Kugeln von den Radien r und $R = 2r$, von denen die erstere mit der Elektricitätsmenge E, die zweite mit der Menge $4E$ geladen sei. Man findet:

		Auf der ersten Kugel	Auf der zweiten Kugel
Das Potential	=	$\frac{E}{r}$	$\frac{4E}{2r} = \frac{2E}{r}$,
Die Dichte	=	$\frac{E}{4r^2\pi}$	$\frac{4E}{16r^2\pi} = \frac{E}{4r^2\pi}$.

Dichte und daher auch Spannung sind also auf beiden gleich gross, dagegen das Potential auf der zweiten doppelt so gross, es muss daher positive Elektricität von der zweiten Kugel auf die erstere übergehen.

Für den Uebergang der Elektricität auf oder durch dielektrische Körper, also z. B. für das Ueberschlagen von Funken durch die Luft, ist dagegen die Dichte respective Spannung von entscheidendem Einflusse.

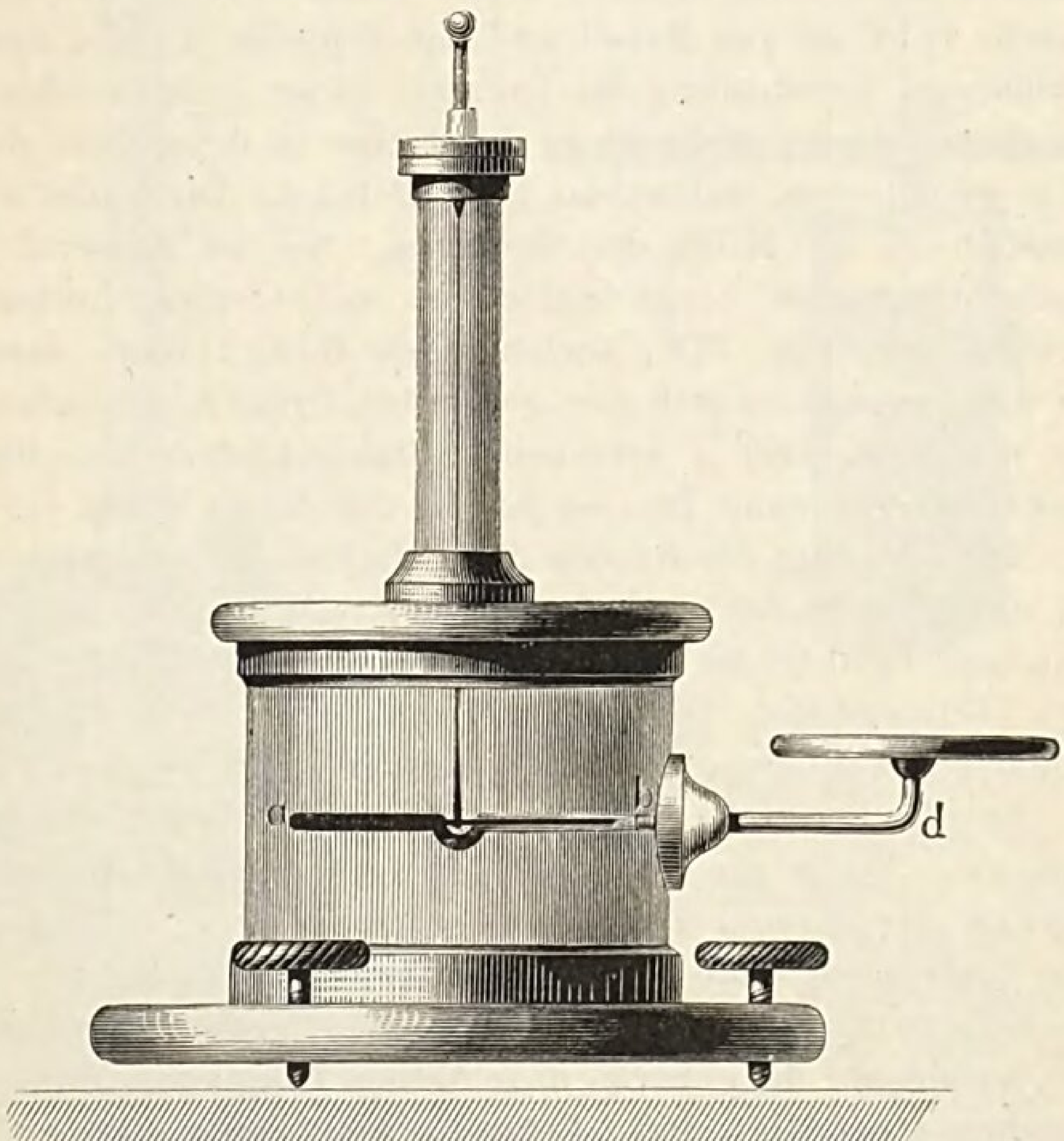
70 **Apparate zur Messung des Potentials. Elektrometer nach Dellmann und R. Kohlrausch.** So wie man die Temperatur eines Körpers dadurch zu messen vermag, dass man denselben mit einem Thermometer in leitende Verbindung setzt und das Eintreten des Wärmegleichgewichts abwartet, so kann man auch die Höhe des Potentials eines Leiters messen, indem man denselben mit einem geeigneten Elektrometer in Verbindung setzt. So wie das Thermometer hierbei dem Körper Wärme entzieht, welche entweder vernachlässigt oder in Rechnung gebracht wird, so nimmt auch das Elektrometer einen Theil der Elektricität auf. Ist die Capacität des Elektrometers verschwindend klein gegenüber

der des zu untersuchenden Leiters, so kann auch hier die übergegangene Elektricitätsmenge und die dadurch bewirkte Erniedrigung des Potentials vernachlässigt werden.

Von den Elektrometern, welche auf dem Princip der Drehwage beruhen, sind die von Peltier, Oersted, Dellmann, R. Kohlrausch, W. Thomson und Romershausen wegen ihrer hohen Empfindlichkeit hervorzuheben.

Fig. 177 stellt ein modificirtes Dellmann'sches Elektrometer dar. An einem Coconfaden hängt, mittelst etwas Schellack daran befestigt, ein feines gerades metallenes Stäbchen (Nadel). Es senkt

Fig. 177.



sich mit seiner Mitte in den Ausschnitt eines aus Messing- oder Silberblech verfertigten Streifchens *ab*; die eine Hälfte desselben ist ein klein wenig nach vorn, die andere etwas zurückgebogen, so dass sich die metallische Nadel der Länge nach, und zwar mit seiner einen Hälfte an die eine, mit der anderen an die andere Seite des Streifchens *ab* anlegen kann. Der obere Theil der Vorrichtung wird so gedreht, dass die Nadel durch die Torsion des Fadens an den Streifen *ab* ganz schwach angedrückt wird.

Ein Messingdraht *bd* geht isolirt durch eine in die Seitenwand des Gefässes gebohrte Oeffnung und wird durch eine aufgekittete Fassung

von Holz oder Metall gehalten. Innerhalb des Gefässes trägt er das Streifchen *ab*, ausserhalb eine Condensatorplatte oder eine kleine Metallkugel.

Sobald dem Draht *bd* die geringste Menge Elektricität mitgetheilt wird, geht ein Theil derselben auf die Nadel über, welche nun vom Streifchen *ab* abgestossen wird und, in Ruhe gekommen, einen um so grösseren Winkel mit *ab* macht, je stärker die Ladung war.

R. Kohlrausch hat das Dellmann'sche Elektrometer in ein Instrument umgewandelt, welches zu den feinsten Messungen geeignet ist*). Fig. 178 stellt dasselbe dar, wie es vom Mechanicus Schubert in Marburg (nach dessen Zeichnung Fig. 178 gestochen ist) construirt wird. Das Gehäuse *A*, welches mittelst dreier Stellschrauben auf einem eisernen Gestelle ruht, ist von Metall und hat doppelte Wände, um die durch ungleichmässige Erwärmung im Inneren leicht entstehenden Luftströmungen zu verhüten. Oben ist es durch eine in ihrer Mitte durchbohrte Glasplatte geschlossen, welche das Rohr *B* trägt. Die Nadel *nn* befindet sich ziemlich in der Mitte des Gehäuses. Sie ist äusserst leicht aus Silber gearbeitet und hängt an einem sehr feinen, unten in einen Schellackfaden *m*, Fig. 179, auslaufenden Glasfaden, dessen oberes Ende in der Axe eines durch den getheilten Kreis *K* gehenden, mit dem Zeiger *z* und dem Griff *g* versehenen Stahlcylinders befestigt ist. So lange der Glasfaden ohne Torsion ist, ist der Zeiger *z* mit der Nadel *nn* parallel. Die Theilung des Kreises *K* ist derjenigen entsprechend, welche auf dem unter der Nadel *nn* befindlichen Kreise angebracht ist, d. h. die gleichnamigen Theilstriche beider Kreise befinden sich stets in einer und derselben Verticalebene. Die Ablesung der Nadel *nn* geschieht von oben mit Hülfe des beweglichen Diopters *o* und der mit einer Marke versehenen Lupe *l*. In gleicher Höhe mit der Nadel *nn* befindet sich das Silberstreifchen *aa*. Wenn die Nadel sich ihrer ganzen Länge nach an die beiden Arme des Streifchens *aa* anlegt, so zeigt die Nadel (also auch, wenn das Instrument ohne Ladung ist, der Zeiger *z*) auf 0°.

Das Silberstreifchen *aa* ist von zwei Schellacksäulchen *bb*, Fig. 179, getragen, welche auf dem oberen durch einen Ring verstärkten Rande des Messingrohres *c* befestigt sind. Letzteres geht genau passend durch den Boden des Gehäuses *A* hindurch und kann durch einen Hebel mittelst der Schraube *d*, Fig. 178, innerhalb enger Grenzen auf und nieder bewegt werden. In seiner höchsten Stellung berührt das Streifchen die Nadel, während es in seiner tiefsten Stellung ungefähr 1,2 mm davon absteht.

In dem Rohre *c* lässt sich ein zweites Messingrohr mittelst des Hebels *e* auf und nieder bewegen. Dieses innere Rohr trägt den gleichfalls aus Silber verfertigten Zuleitungsdraht, welcher oben in eine federnde Spirale, unten in einen kleinen Ring *r*, Fig. 178, ausläuft. Er wird von zwei

*) Pogg. Ann. Bd. LXXII.

dünnen Schellackplättchen getragen, durch welche die beiden Enden des inneren Messingrohres geschlossen sind. In seiner höchsten Stellung legt sich die federnde Spirale an das Silberblättchen an, durch welches das Streifchen *a a* getragen wird, in seiner tiefsten Stellung sinkt es unter den oberen Rand des Rohres *c* hinab. Man hat daher, um die

Fig. 178.

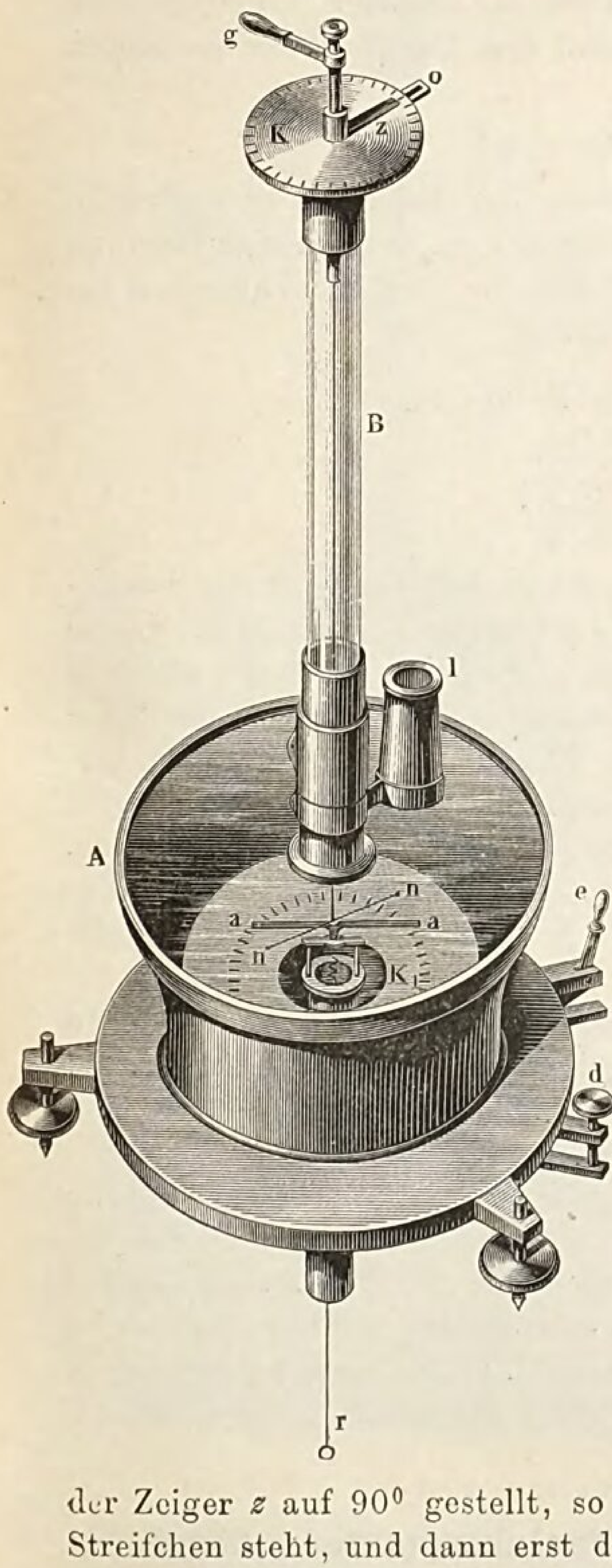
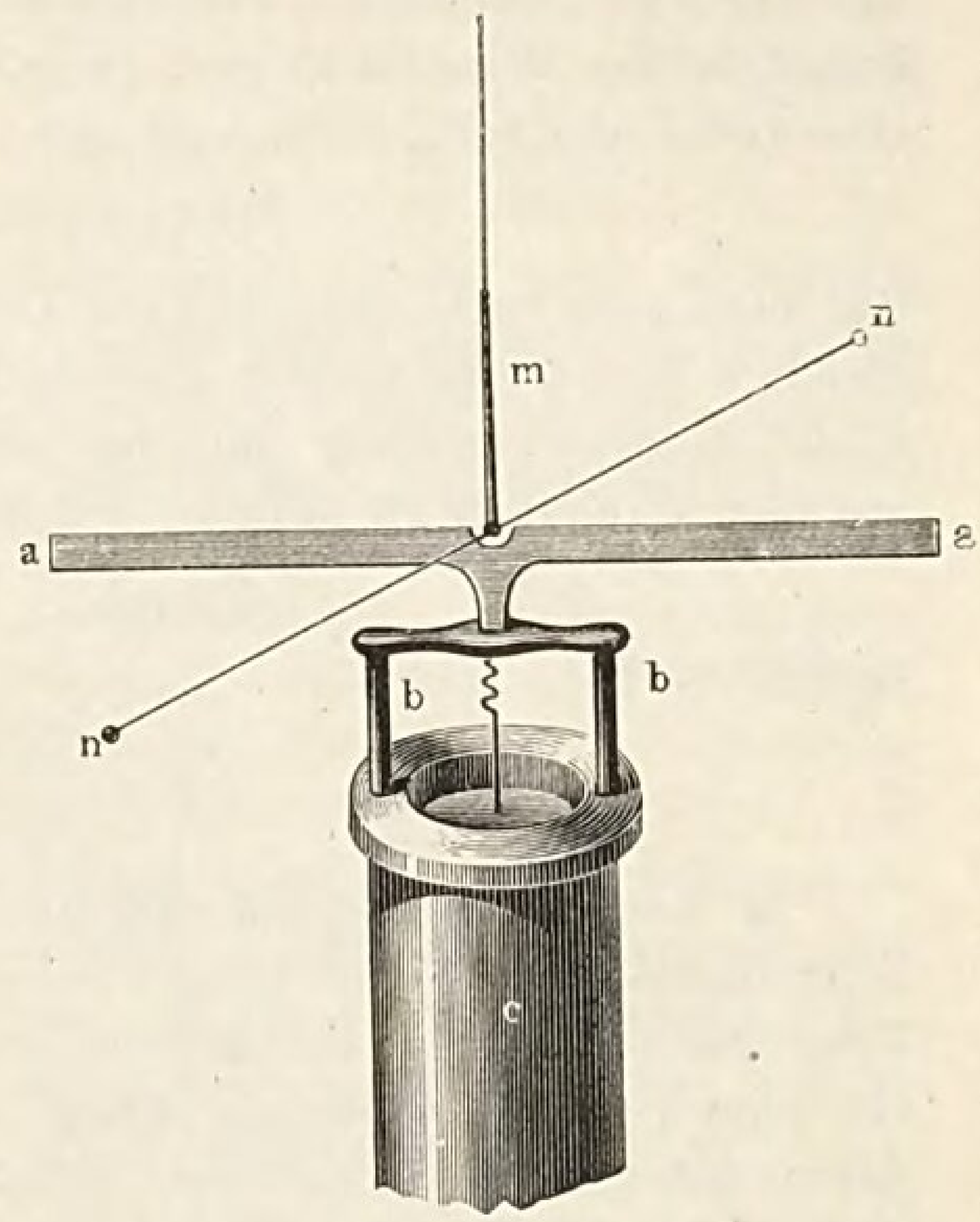


Fig. 179.



Nadel, das Streifchen *a a* und den Zuleitungsdraht mit einander in Verbindung zu bringen und das Instrument zu laden, nur die beiden Hebel *d* und *e* niederzudrücken, und das untere Ende *r* des Zuleitungsdrahtes mit der Elektricitätsquelle in Berührung zu bringen. Nachdem die Ladung erfolgt ist, wird das Streifchen *a a* sowohl wie der Zuleitungsdraht wieder gesenkt.

Damit das Streifchen *a a* und die Nadel *n n* ein möglichst grosses Quantum der zu prüfenden Elektricität aufnehmen können, wird anfänglich der Zeiger *z* auf 90° gestellt, so dass die Nadel rechtwinkelig zu dem Streifchen steht, und dann erst die Hebung des Streifchens *a a* etc. vorgenommen.

Nachdem man dem Instrumente seine Ladung ertheilt und das Streifchen sowohl wie den Zuleitungsdraht wieder gesenkt hat, wird

der Zeiger z in der Richtung gegen den Nullpunkt hin und dann noch um einen Winkel v über denselben hinausgedreht und dadurch der Winkel, welchen die Nadel mit dem Streifen aa macht, auf eine bestimmte Grösse φ reducirt. Die Torsion des Fadens ist nun gleich $(v + \varphi)$, die Kraft, mit welcher der Faden vermöge dieser Torsion die Nadel dem Streifchen zu nähern strebt, ist also $T\,(v + \varphi)$. — Die Kraft, mit welcher sich Streifchen und Nadel abstossen, ist aber jedenfalls eine Function des Winkels φ und proportional dem Quadrate der Ladung e, also gleich $e^2 f\,(\varphi)$, wir haben also

$$c^2 f\,(\varphi) = T\,(v + \varphi).$$

Hat man nun nach vollständiger Entladung des Apparates demselben in gleicher Weise eine zweite Ladung e' beigebracht, so wird eine Drehung v' des Zeigers z nöthig sein, um die Nadel und Stäbchen abermals bis auf den Winkel φ zu nähern, wir haben also

$$e'^2 f(\varphi) = T\,(v' + \varphi),$$

mithin auch

$$\frac{e}{e'} = \frac{\sqrt{v + \varphi}}{\sqrt{v' + \varphi}}.$$

In den Elektrometern von Oersted und Peltier wird die bewegliche Nadel durch eine magnetische Stahlnadel gebildet, welche beim Oersted'schen Instrument an einem Coconfaden hängt, während sie beim Peltier'schen auf einer Stahlspitze spielt, welche in der Mitte des feststehenden Streifchens aufsitzt. Wenn das Instrument so aufgestellt ist, dass das Streifchen im magnetischen Meridian liegt, so wird die Magnetnadel sich ihrer ganzen Länge nach an das Streifchen anlegen, so lange der Apparat ohne Ladung ist, sie wird aber um so mehr aus dem magnetischen Meridian abgelenkt, je stärker die ihm mitgetheilte elektrische Ladung ist.

Bei der Peltier'schen Einrichtung bleiben Nadel und Streifchen stets in metallischer Verbindung, weshalb dieselbe sehr geeignet ist, um die allmäligen Aenderungen der Ladung eines mit ihm verbundenen elektrisirten Körpers anzugeben.

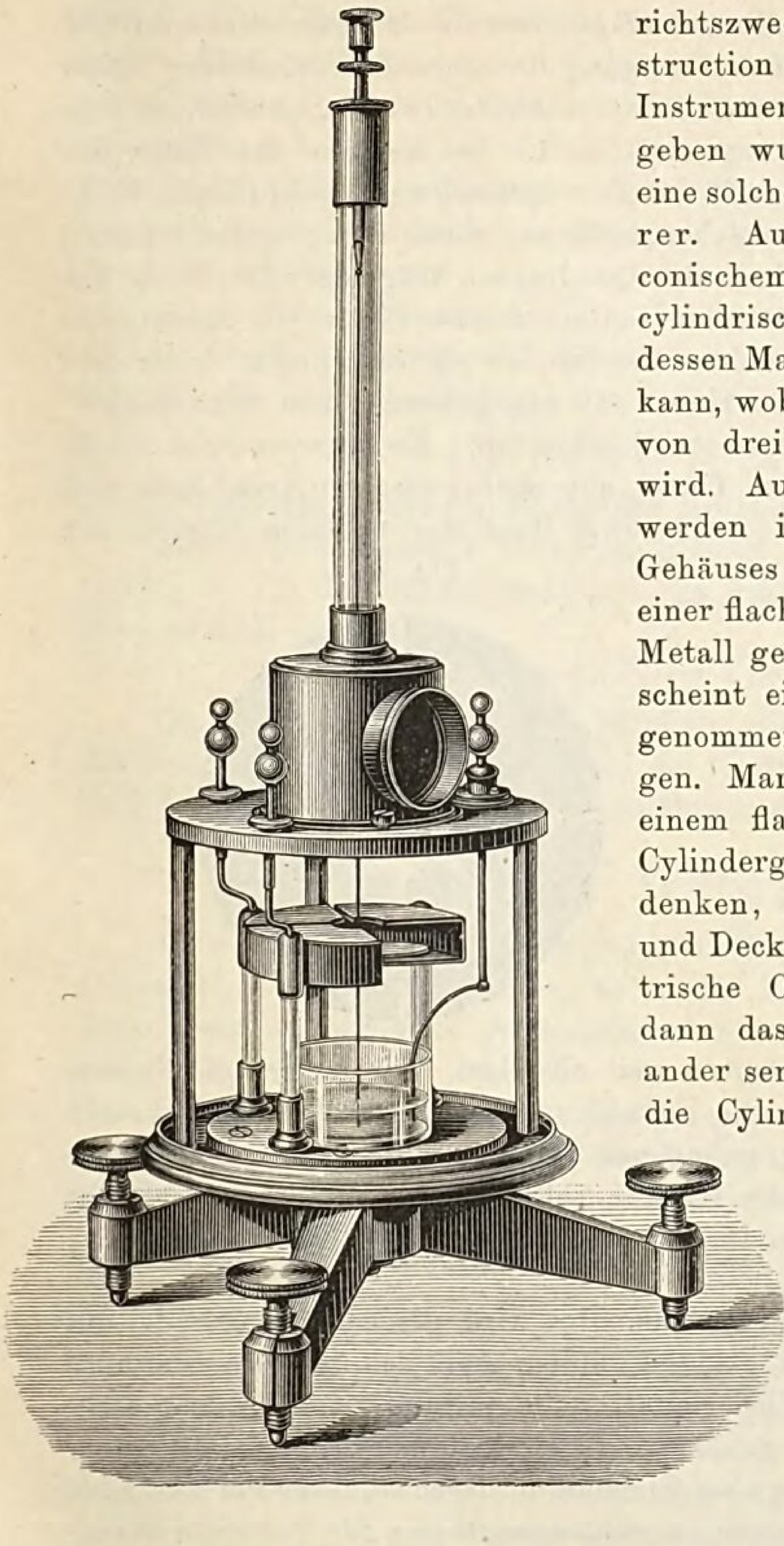
Das zu sehr genauen Messungen geeignete Sinuselektrometer von R. Kohlrausch*) ist aus dem Peltier'schen Instrumente dadurch hervorgegangen, dass Kohlrausch auch den die Nadel abstossenden Metallstreifen um die verticale Axe des Instruments drehbar machte und die Ablesevorrichtung wesentlich verbesserte. Die eben beschriebenen Instrumente sind durch das im nächsten Paragraphen beschriebene ziemlich verdrängt worden.

71 **W. Thomson's Quadrantenelektrometer; absolutes Elektrometer.** Von W. Thomson sind mehrere Elektrometer con-

*) Pogg. Ann. Bd. LXXXVIII.

struirt worden*), die sich durch hohe Empfindlichkeit und sinnreiche Nebenapparate auszeichnen. Wir wollen hier das Quadrantenelektrometer in der einfacheren, leichter zu behandelnden und für Unterrichtszwecke übersichtlicheren Construction beschreiben, welche dem Instrumente auf dem Continente gegeben wurde. Fig. 180**) zeigt eine solche Ausführung von E. Stöhrer. Auf einem Dreifuss ruht auf conischem Zapfen ein drehbares cylindrisches Gehäuse von Messing, dessen Mantel abgenommen werden kann, wobei die Decke des Gehäuses von drei Messingsäulen getragen wird. Auf vier isolirenden Trägern werden innerhalb des erwähnten Gehäuses vier gesonderte Sectoren einer flachen cylindrischen Dose aus Metall getragen. In der Figur erscheint einer dieser Sectoren weggenommen, um das Innere zu zeigen. Man kann sich diese Dose aus einem flachen rings geschlossenen Cylindergefässe dadurch hergestellt denken, dass zunächst im Boden und Deckel eine kreisrunde concentrische Oeffnung angebracht und dann das Gefäss durch zwei einander senkrecht schneidende, durch die Cylinderaxe gehende Schnitte in vier Stücke zerschnitten wurde. Jedes solche Stück heisst ein Quadrant. Je zwei gegenüberliegende Quadranten sind unter sich und mit einem Zuführungsdrahte verbunden, welcher isolirt durch den

Fig. 180.



*) Rep. Brit. Assoc. 1855 (2), p. 22. Eine Abbildung und Beschreibung der wichtigeren Originalinstrumente findet sich in Wiedemann's Lehre von der Elektricität I, 165 bis 179.

**) Diese Figur ist Wiedemann's Lehre von der Elektricität entnommen.

Deckel geführt ist und dort in eine Klemme endigt. Ueber eine kreisförmige grössere Oeffnung im Deckel des Gehäuses ist ein kleineres Cylindergehäuse gesetzt, dessen innere Einrichtung aus Fig. 181 zu entnehmen ist. Der abnehmbare Mantel desselben ist mit einem Glasfenster versehen. Der innere Metallbügel trägt oben ein drehbares Glasrohr und dieses eine Vorrichtung zur Aufhängung des Coconfadens, dessen beide Enden daselbst in geringem regulirbarem Abstande befestigt sind, so dass also eine bifilare Aufhängung stattfindet. In die von der Mitte des Coconfadens gebildete Schleife ist das hakenförmig gekrümmte Ende eines Drahtes eingehängt, welcher, wie bei einem Spiegelgalvanometer, einen Spiegel trägt. Innerhalb des Quadranten trägt derselbe Draht die sogenannte Nadel, d. i. eine horizontale dünne Platte aus Aluminium in Form eines Biskuits, welches überdies durch Ausschnitte erleichtert ist. Fig. 182 zeigt die von Maxwell angegebene Form der „Nadel" mitsammt den darunter liegenden Quadranten. Es ist wesentlich, dass die Begrenzungslinien dieser Theile aus concentrischen Kreisbögen und radialen Stücken gebildet seien, sowie dass die radialen Ränder der

Fig. 181

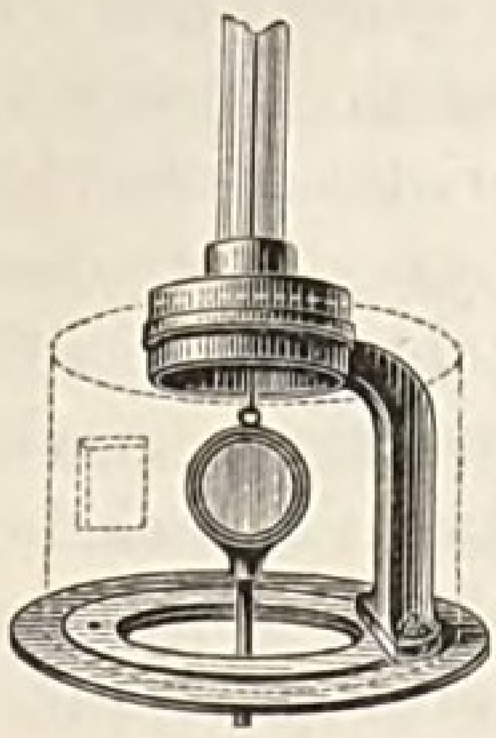
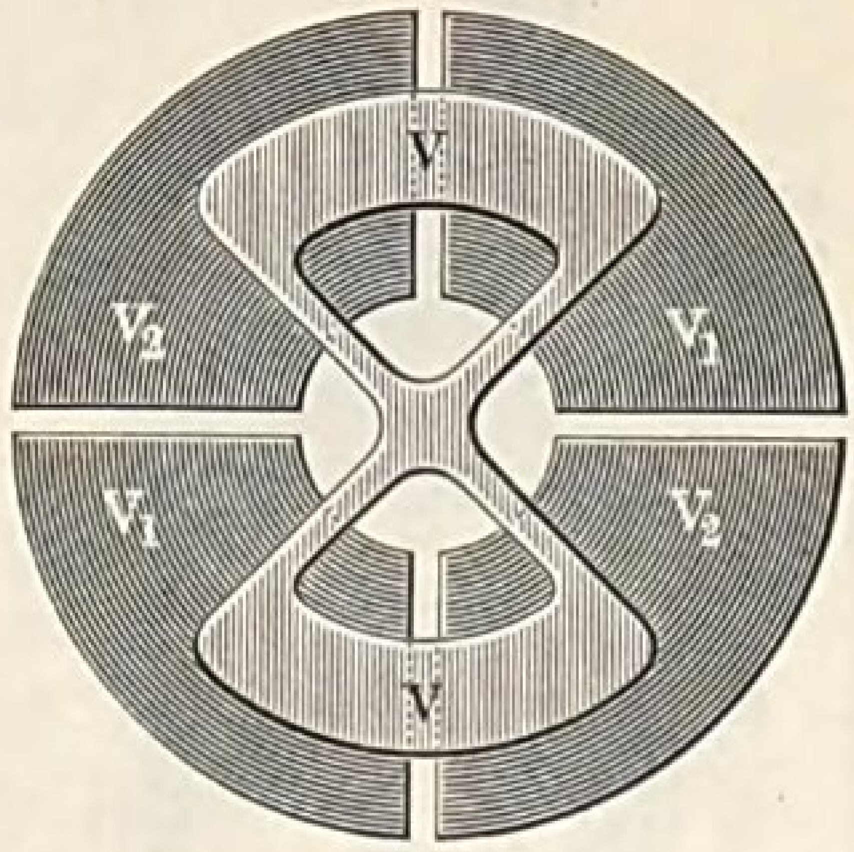


Fig. 182.



Nadel von denen der Quadranten weit abstehen. Die Ecken und Kanten sind überdies abgerundet. Die Fortsetzung des Drahtes endlich taucht unten mit dem ringförmig gebogenen Ende in ein Gefäss mit concentrirter Schwefelsäure, welche letztere selbst wieder durch einen Draht mit einer Klemme auf dem Deckel des Gefässes isolirt von diesem verbunden ist.

Bei der Benutzung des Instrumentes wird die Aluminiumnadel auf ein relativ hohes Potential geladen, indem man den zur Schwefelsäure führenden Draht mit der Elektricitätsquelle verbindet. Als solche dient entweder das Innere einer geladenen Leydenerflasche oder der Pol einer galvanischen Batterie von vielen Elementen, deren anderer Pol zur Erde abgeleitet ist, oder — weniger empfehlenswerth — der Pol einer Zamboni'schen Säule. Von diesen Hülfsapparaten kann erst später die Rede sein. Von den Quadranten werden die über Eck stehenden, wie erwähnt, unter sich und dann jedes Paar mit einem jener beiden Leiter verbunden, deren Potentialdifferenz gemessen werden soll. In der Regel wird also ein Quadrantenpaar zur Erde abgeleitet, das andere mit dem zu messen-

den Leiter verbunden. So lange die Quadrantenpaare das gleiche Potential haben, z. B. unelektrisch sind, schwebt die Nadel symmetrisch über denselben, wie in Fig. 180. Sind die Potentiale der Quadrantenpaare V_1 und V_2, jenes der Nadel $= V$, wobei $V > V_1 > V_2$ sei, so hat die Nadel gegen die Quadranten mit V_2 eine grössere Potentialdifferenz als gegen die Quadranten mit V_1; sie sucht sich daher so zu stellen, dass sie mit einem grösseren Theile ihrer Fläche den Quadranten V_2 gegenübersteht, d. h. sie muss sich in der Figur 180 nach links drehen und zwar so lange, bis das Gleichgewicht eingetreten ist. Der Drehungswinkel wird mit Spiegel und Scala gemessen, wie bei den magnetischen Messungen im §. 18 erklärt wurde.

Nach Berechnungen, die wir hier nicht reproduciren können, gilt für die Kraft F, welche auf die Aluminiumnadel wirkt, vorausgesetzt, dass sie die angegebene Form hat, folgende Beziehung:

$$F = a\,(V_1 - V_2)\,\{V - {}^1\!/_2\,(V_1 + V_2)\}.$$

Hierin bedeutet a eine Constante des Instruments.

Macht man daher V sehr viel grösser, als das mittlere Potential ${}^1\!/_2(V_1 + V_2)$ der Quadrantenpaare, so kann mit genügender Annäherung gesetzt werden

$$F = a\,(V_1 - V_2)\,V.$$

Da überdies bei den kleinen Winkeln, die hierbei beobachtet werden, die Scalenausschläge S proportional der Kraft F zu setzen sind, so erhält man für die zu messende Potentialdifferenz den Ausdruck:

$$V_1 - V_2 = \frac{S}{a\,V}.$$

War das eine Quadrantenpaar, z. B. jenes mit dem niedrigeren Potential, zur Erde abgeleitet, so ist das Potential des anderen Paares direct proportional dem Scalenausschlag und verkehrt dem Potential der Nadel.

Statt das letztere direct zu messen, aicht man das Instrument, indem man unmittelbar vor dem eigentlichen Versuche eine schon bekannte Potentialdifferenz, z. B. jene eines Normaldaniellelementes, auf die Quadrantenpaare überträgt und hierdurch die Constante $\frac{1}{a\,V}$ ausmittelt, welche für die vorhandene Ladung der Nadel gilt.

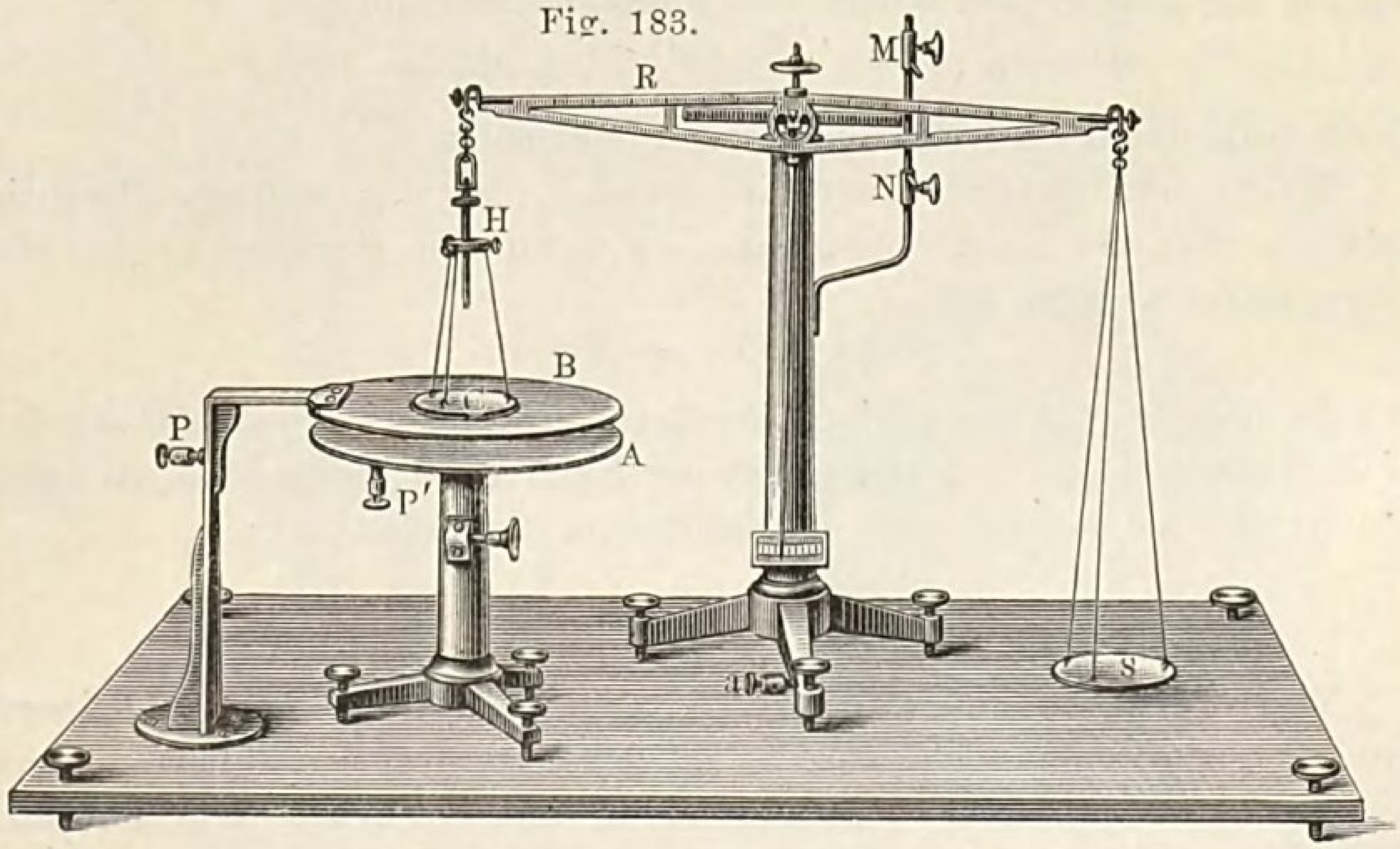
Eine andere Art, sich des Instrumentes zu bedienen, besteht darin, dass man die beiden Quadrantenpaare auf gleich grosse bekannte positive und negative Potentiale bringt, also $V_1 = -V_2$ macht und dann das zu messende Potential V auf die Nadel überträgt. In diesem Falle wird F genau $= 2\,a\,V_1\,V$, also das zu messende Potential V genau proportional den Ausschlägen, auch wenn es nicht sehr gross ist gegenüber dem der Quadranten.

Auf alle Fälle dient das beschriebene Instrument nur zu Messungen der relativen Werthe der Potentialdifferenzen. Um es mit Erfolg be-

nutzen zu können, ist überdies eine Reihe von Vorsichtsmaassregeln zu beobachten, welche wir hier nicht besprechen können *).

Das Thomson'sche Originalinstrument ist viel complicirter eingerichtet als das beschriebene. Dasselbe ist in einem Gehäuse von Glas eingeschlossen, welches zugleich als Leydener Flasche dient, deren innere Belegung mit der Nadel communicirt. Die Directionskraft der Nadel wird durch einen mit aufgehängten und durch einen äusseren Magnet oder neuestens durch bifilare Aufhängung herbeigeführt. Die Constanz der Ladung wird mittelst eines eigenen Messapparates controlirt und falls sie sich geändert hat, mittelst eines Füllapparates (*Replenisher*), welcher im Wesentlichen einer Varley'schen Maschine (§. 62) entspricht, die Ladung vermehrt oder vermindert. Edelmann hat der Nadel die Form von zwei Cylinderabschnitten gegeben, welche inner-

Fig. 183.



halb der verticalen cylindrischen Quadranten schwingen. Für gröbere Versuche oder Demonstrationen hat man endlich statt der dosenförmigen Quadranten auch einfache Platten angewendet, über welchen die Nadel schwebt **). Es bringt dies aber den Nachtheil, dass geringe Aenderungen des Nadelabstandes mehr Einfluss haben.

Das absolute Elektrometer von W. Thomson beruht auf der Anziehung zweier paralleler Platten, deren eine kleinere mit einem sogenannten Schutzringe umgeben ist. Da das Originalinstrument von Thomson sehr complicirt ist, so wollen wir die Wirkungsweise desselben an dem vereinfachten, zu Vorlesungszwecken geeigneten Instrumente vom Mechaniker Eis in Wien, welches in Fig. 183 abgebildet ist, erläutern. An einer feinen Wage ist einerseits eine gewöhnliche Schale *s*,

*) Siehe W. Hallwachs, Wiedem. Ann. 29, S. 1 (1886); 29, S. 300.

**) In der vorigen Auflage ist ein solches Instrument auf Seite 134 (Fig. 122 bis 125) abgebildet.

andererseits an abgekürzter Aufhängevorrichtung eine kreisförmige Metallplatte C angehängt. Letztere schwebt, ohne den Rand zu berühren, in dem kreisförmigen Ausschnitte der gleich dicken Platte B, welche als Schutzring dient. Derselbe wird durch die Säule P getragen und wird über a, R und H mit der Platte C in leitende Verbindung gebracht, so dass B und C stets auf demselben Potential und zwar dem der Erde sich befinden. Die Dichte der Elektricität ist auf einer Scheibe am Rande grösser als in der Mitte; im mittleren Theile herrscht jedoch eine ziemlich constante Dichte längs einer Fläche von der Grösse der Platte C. Dieser mittlere Theil allein wird bei der Messung benutzt. Der Schutzring dient also nur dazu, diese constante Dichte auf C herzustellen. Unterhalb der Platte B ist eine gleich grosse vollkommen isolirt und in ihrer Höhe mikrometrisch verstellbare Metallplatte aufgestellt, welche durch die Klemme P' mit demjenigen Körper verbunden wird, dessen Potential zu messen ist. M und N sind zwei verstellbare Anschläge, um die Schwingungen des Balkens zu begrenzen. Die Aufhängevorrichtung H enthält die nöthigen Correctionstheile, um die Platte C parallel zur Ebene von B und concentrisch zu ihrer Oeffnung zu stellen. Das auf C gelegte Gewicht G reiche eben hin, um die Ebene von C mit der von B zusammenfallen zu machen, während A ebenfalls sich auf dem Potential der Erde befindet. Nun entfernt man das Gewicht G von C, bringt A auf das zu messende Potential V, wodurch Anziehung von C erfolgt, und vergrössert den Abstand zwischen den Platten A und C, bis die letztere genau wiederum in die Ebene von B zu schweben kommt. Offenbar ist dann die elektrische Anziehungskraft f gleich der Zugkraft des Gewichtes G, also $= g\,G$. Kennt man nun noch den Flächeninhalt S der Platte C, den Abstand a derselben von A, so ist die Potentialdifferenz der beiden Platten aus der Gleichung:

$$V - V_0 = a\sqrt{\frac{8\pi f}{S}}$$

zu berechnen, wo V_0 gleich dem Potential der Erde, also $=$ Null, ist.

Wenn der Apparat gestattet, auch B und C von der Erde zu isoliren und etwa durch Verbindung mit dem inneren Beleg einer geladenen Leydener Flasche, beide auf ein constantes Hülfspotential V' von entgegengesetztem Zeichen mit dem zu messenden zu bringen, so kann man die unsichere Messung von a eliminiren. Man bestimmt statt dessen nur die Verschiebung $a - a'$, welche man der Platte A geben muss, damit dieselbe bei den Potentialen V_0 und V die obere Platte in die Ebene von B bringt. Es ist dann:

$$V' - V_0 = a\sqrt{\frac{8\pi f}{S}}$$

$$V' - V = a'\sqrt{\frac{8\pi f}{S}}.$$

woraus

$$V - V_0 = (a - a') \sqrt{\frac{8 \pi f}{S}}.$$

Um das Potential in absoluten elektrostatischen Einheiten des Cent.-Grm.-Sec.-Systems zu erhalten, hat man G in Grammen, g und $a - a'$ in Centimetern, S in Quadratcentimetern zu messen.

Eine beachtenswerthe Form des absoluten Elektrometers ist das zuerst von E. Mach*) angewendete Kugelelektrometer, welches vor dem Plattenelektrometer den Vortheil voraus hat, dass zur absoluten Messung des Potentials nur die Messung jener Kraft f erforderlich ist, mit welcher die obere bewegliche Halbkugel von der unteren festgestellten Kugelhälfte abgestossen wird. Die Längenmessung entfällt dagegen. Der Zusammenhang zwischen dieser Kraft f und dem Potential V ist gegeben durch die Gleichung:

$$f = \frac{V^2}{8}.$$

Um diese Beziehung abzuleiten, denken wir uns, die mit der Elektricitätsmenge E geladene Kugel vom Radius r vergrössere sich auf den Radius $r + \varrho$.

Der Energieinhalt verkleinert sich dann um

$$\frac{E^2}{2r} - \frac{E^2}{2(r+\varrho)} = \frac{E^2}{2}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r+\varrho}\right) = \frac{E^2}{2}\,\frac{\varrho}{r^2 + r\varrho}.$$

Denkt man sich den Zuwachs des Radius ϱ verschwindend klein gegen r, so können wir im Nenner $r\varrho$ neben r^2 fortlassen und erhalten als Aenderung der Energie

$$\frac{E^2 \varrho}{2 r^2}.$$

Diese Grösse muss gleich sein der Arbeit, welche der elektrischen Abstossung entgegen aufgewendet werden müsste, um die Ladung E von der vergrösserten Kugel wieder auf die kleinere zusammenzudrängen. Bezeichnen wir die Abstossungskraft pro Oberflächeneinheit mit p, so beträgt diese Arbeit $4 \pi r^2 p \varrho$. Aus der Gleichsetzung

$$\frac{E^2 \varrho}{2 r^2} = 4 \pi r^2 p \varrho$$

ergiebt sich

$$p = {}^1/_8 \, \frac{E^2}{\pi r^4}.$$

Auf die Halbirungsfläche der Kugel übertragen ergiebt dies eine Kraft

*) Zeitschrift des elektrot. Vereins in Wien, December 1883. Auch G. Lippmann hat ein Kugelelektrometer construirt. Journ. de Phys. 2. Serie, Bd. V, 1886, S. 323; daselbst ist auch ein Cylinderelektrometer von Bichat und Blondlot beschrieben.

$$f = r^2 \pi \,.\, \tfrac{1}{8} \frac{E^2}{\pi r^4} = \frac{E^2}{8 r^2} = \frac{V^2}{8},$$

was zu zeigen war. Die Kraft f ist mittelst der Wage zu bestimmen*).

Ansammlungsapparate, Leydener Flasche. An früherer 72
Stelle haben wir bemerkt, dass die Capacität eines Leiters durch Annäherung eines zweiten abgeleiteten Leiters, auf welchen Influenz ausgeübt wird, erhöht wird. Hat man daher eine Elektricitätsquelle von einem gewissen nicht überschreitbaren Potential, z. B. den Conductor einer Elektrisirmaschine zur Verfügung, so kann man auf einem solchen Leiter mit künstlich erhöhter Capacität eine viel grössere Menge Elektricität ansammeln, als auf einem einfachen Leiter gleicher Dimensionen mit derselben Elektrisirmaschine möglich wäre. Ein solcher Apparat, bestehend aus zwei einander genäherten durch ein dielektrisches Medium

Fig. 184.

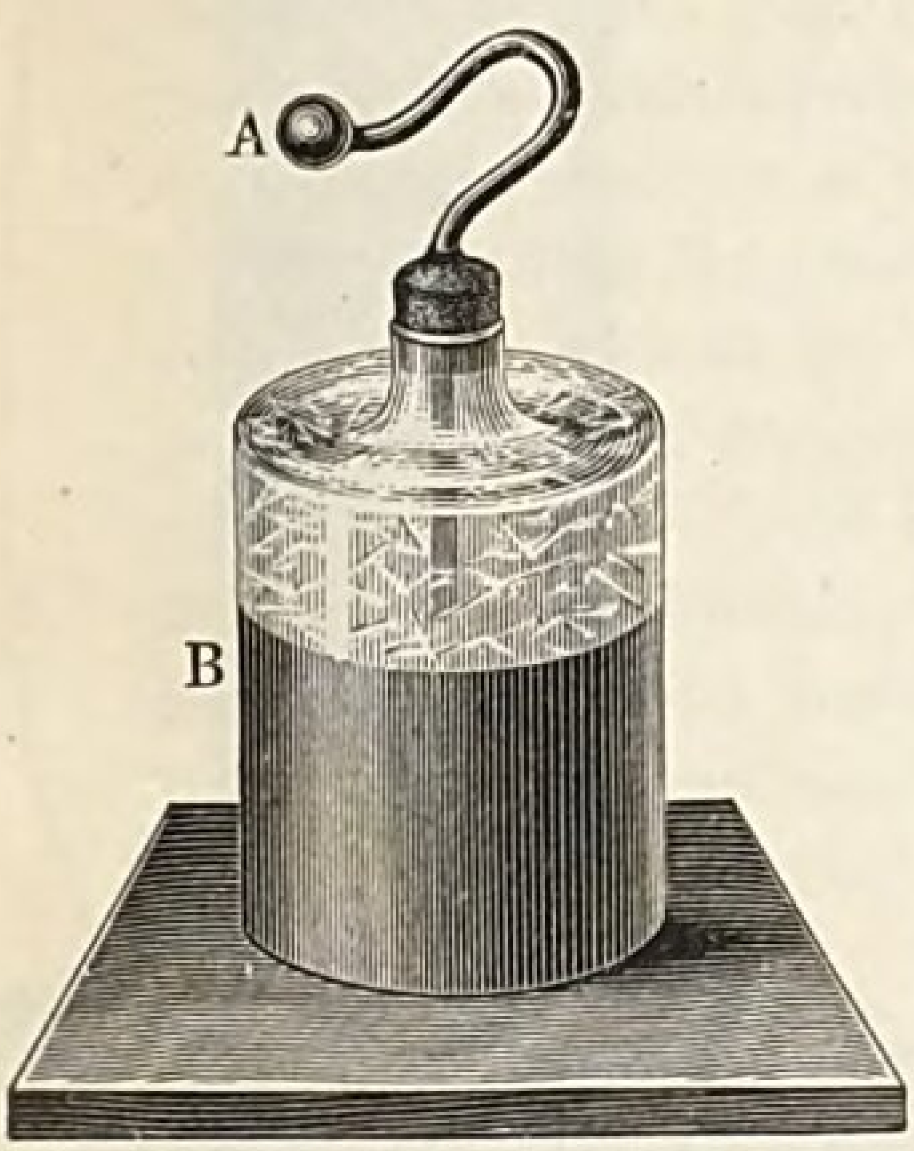


Fig. 185.

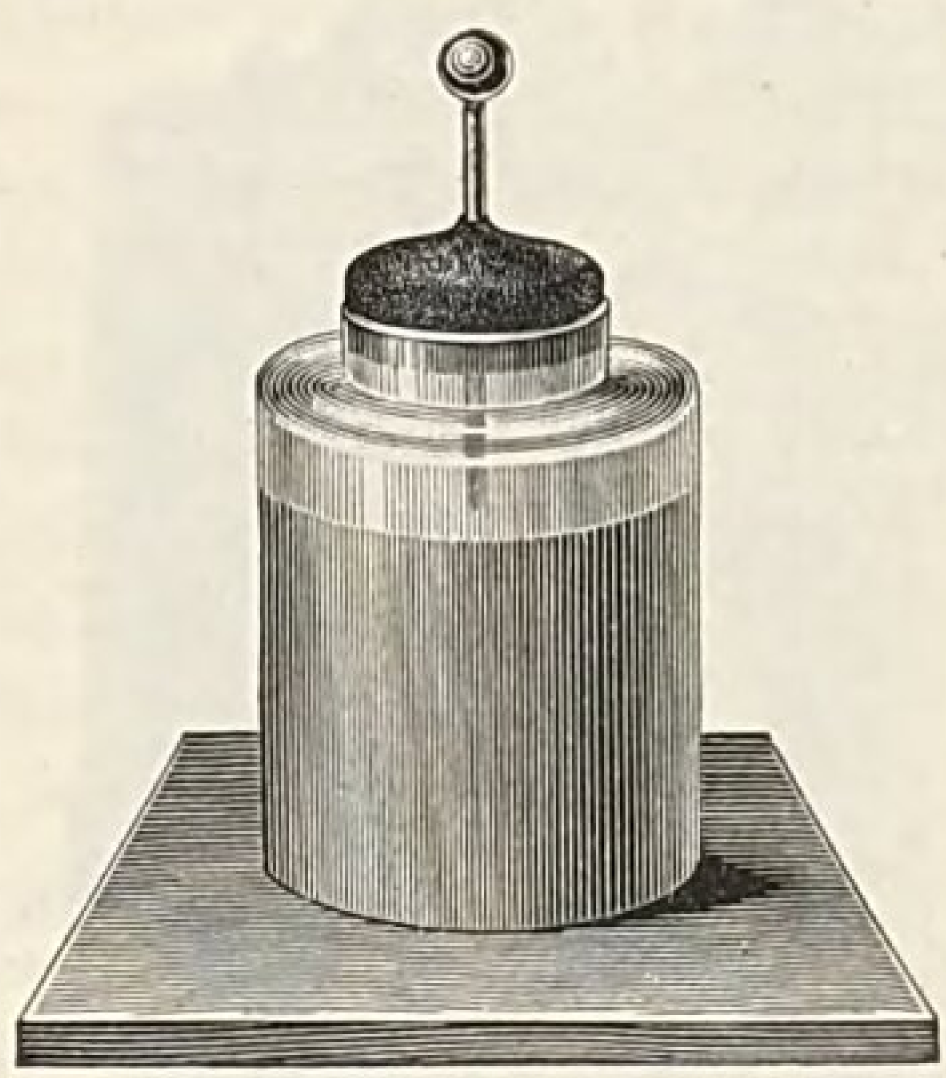
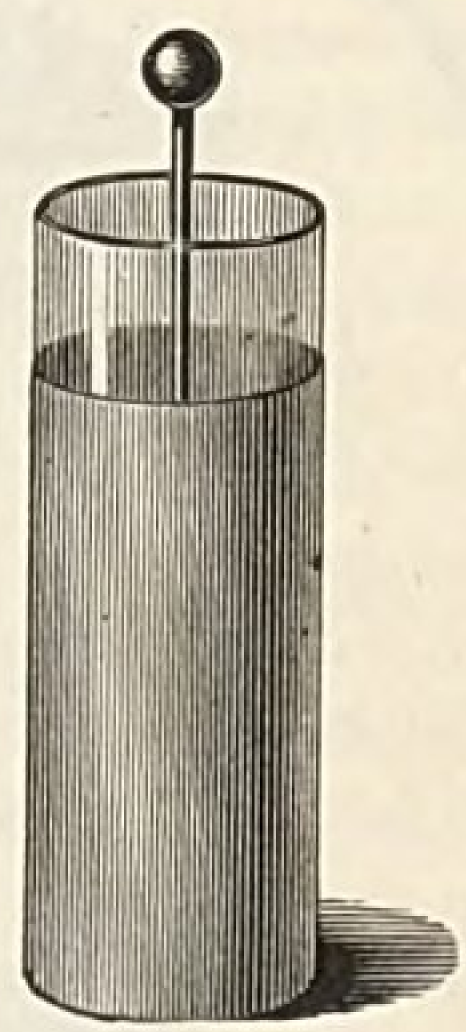


Fig. 186.



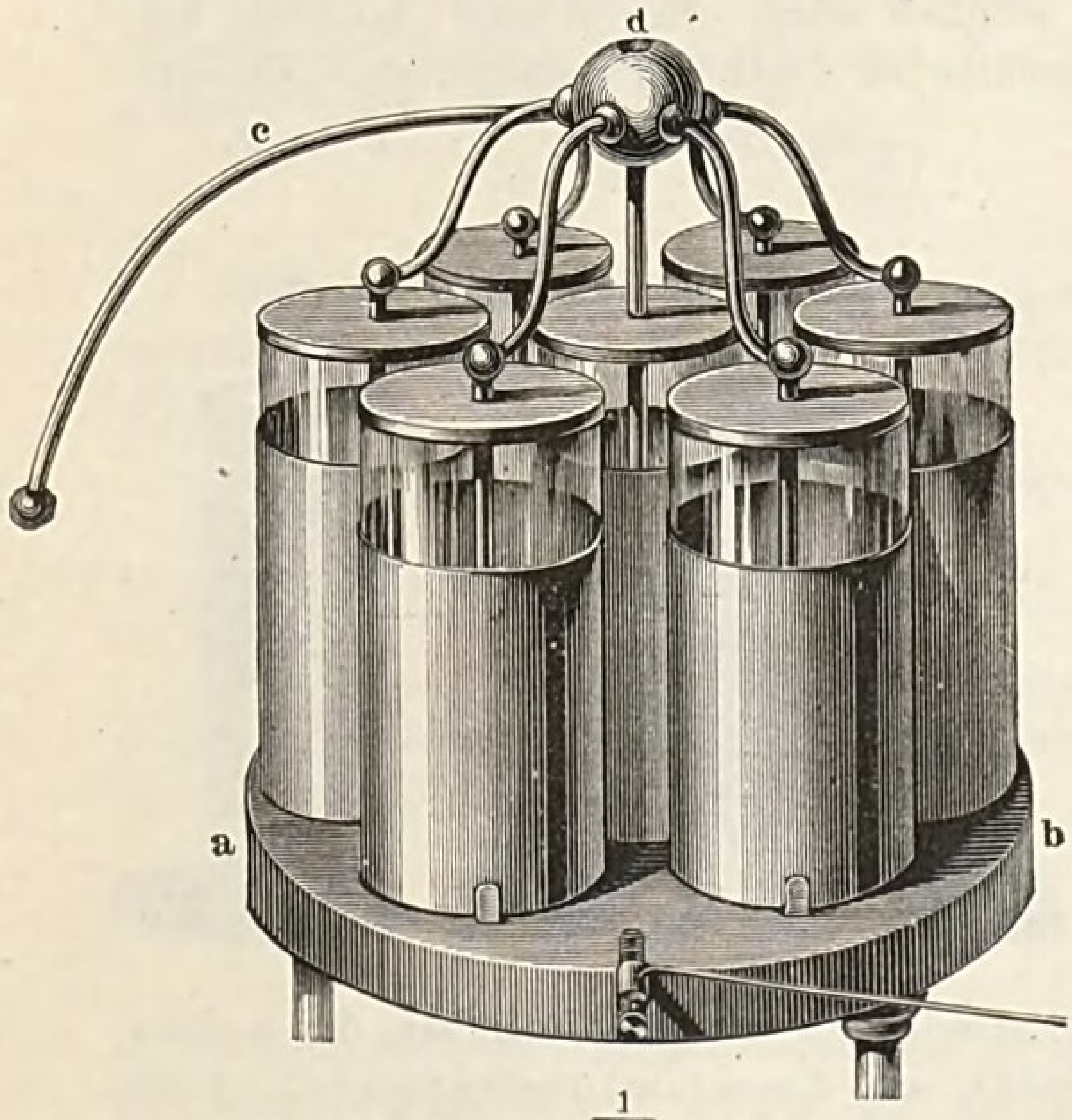
getrennten Leitern, von denen mindestens der eine isolirbar, der andere ableitbar eingerichtet ist, heisst ein Ansammlungsapparat, auch Verstärkungsapparat, in gewissen speciellen Formen auch Condensator, Leydener Flasche, Franklin'sche Tafel.

Die älteste Form ist die der Leydener Flasche oder Kleist'schen Flasche. Der Domherr Kleist in Cammin in Pommern wollte im Jahre 1745 das in einer Glasflasche enthaltene Wasser elektrisiren und liess zu diesem Zwecke auf einen in das Wasser hineingesteckten Nagel die Funken des Conductors einer Elektrisirmaschine fallen. Als er nachher mit der einen Hand die Flasche haltend, mit der anderen den Nagel wegnehmen wollte, erhielt er einen starken elektrischen Schlag. Ein ganz ähnliches Experiment wurde ein Jahr später von Cunaeus in

*) G. Jaumann hat am Platten- sowie auch am Kugelelektrometer die Wägung durch eine Trifilaraufhängung mit Spiegelablenkung ersetzt. Wien. Akad. Ber. XCV, 1887.

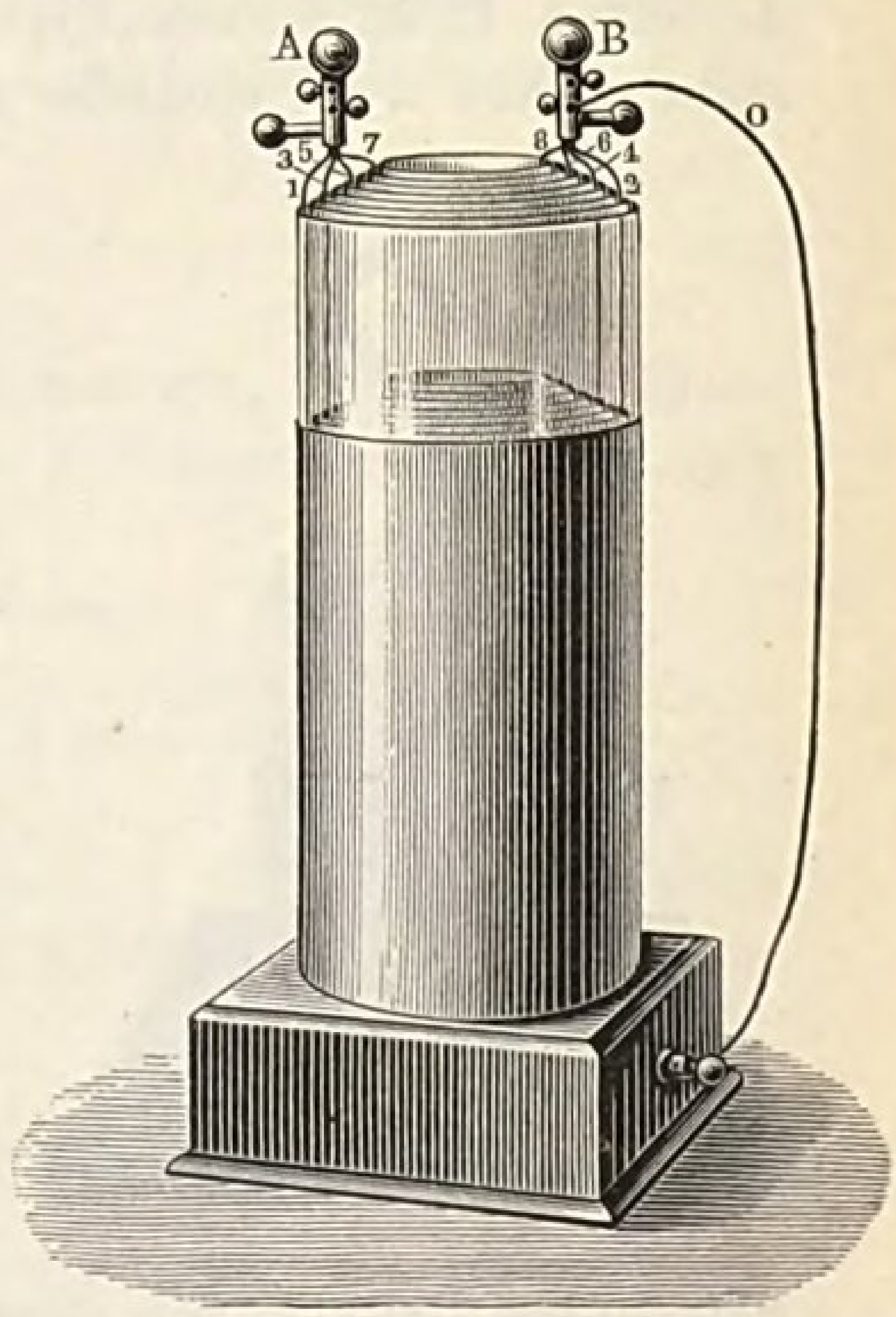
Leyden gemacht, woher der Apparat den Namen Leydener Flasche erhalten hat. Erst später erkannte man, dass die haltende Hand einerseits und das Wasser andererseits zweckmässiger durch zwei metallene Belegungen ersetzt werden können. Die Leydener Flasche besteht demnach aus einem Glasgefässe, welches aussen bis auf mehrere Centimeter vom Rande mit Stanniol beklebt ist; innen ist das Gefäss auf ähnliche Weise mit einer Belegung versehen, oder bei kleineren Flaschen mit engem Halse mit einer leitenden Substanz, etwa mit Feilspänen oder unechtem Goldschaum, gefüllt. Die innere Belegung ist mit einem Messingstabe verbunden, welcher durch den Stopfen oder den Deckel des Gefässes hindurchgeht und mit einem Knopfe endigt. Die Figuren 184, 185 u. 186 (a. v. S.)

Fig. 187.



$\frac{1}{15}$

Fig. 188.



stellen verschiedene Formen der Leydener Flasche dar, von denen die letzte die zweckmässigste ist.

Der nicht belegte Theil des Glases muss gefirnisst werden. Um die Flasche zu laden, bringt man die äussere Belegung mit dem Boden, den Knopf mit dem Conductor der Maschine in leitende Verbindung. Man kann aber auch umgekehrt die innere Belegung mit dem Boden und die äussere mit dem Conductor der Maschine verbinden, wenn man sie vom Boden isolirt hat.

Um recht starke Ladungen zu erhalten, muss man möglichst grosse Flaschen nehmen, oder man muss mehrere Flaschen zu einer elektrischen Batterie verbinden.

Fig. 187 stellt eine für messende Versuche sehr zweckmässige, von Riess angegebene Construction der elektrischen Batterie dar. Auf einem

mit Stanniol überzogenen, durch Glasfüsse getragenen Brett *ab* stehen sieben möglichst gleiche Flaschen von ungefähr 25 qdcm innerer Belegung. Der Knopf der mittleren Flasche wird durch eine hohle Messingkugel *d* von 10 cm Durchmesser gebildet, welche das gebogene, mit einer kleinen Metallkugel endigende Rohr *c* trägt, und welche oben mit einer Höhlung zum Einstecken eines Quadrantenelektrometers versehen ist. Mit den Knöpfen der sechs übrigen um die mittlere herumstehenden Flaschen ist die Kugel *d* durch metallische Bogen verbunden, welche aber nach Belieben von der Kugel *d* entfernt werden können. Die Knöpfe der äusseren Flaschen bilden nämlich Charniere, welche ein Zurückschlagen jener Verbindungsbogen gestatten.

An dem Brett *ab* ist eine Klemmschraube angebracht, in welcher ein die Verbindung mit dem Boden oder mit der Maassflasche (von der alsbald weiter die Rede sein wird) herstellender Draht eingeschraubt wird.

Eine wegen der Raumersparniss recht zweckmässige Anordnung zeigt die von A. Töpler construirte „Schachtelbatterie" (Fig. 188). Acht grosse cylindrische Glasgefässe von gleicher Höhe, aber abnehmendem Durchmesser, von denen jedes wie gewöhnlich innen und aussen mit Stanniol belegt ist, werden in einander gesteckt. Die einzelnen Böden sind durch mehrfache Stanniolzwischenlagen vor zu harter Berührung geschützt. Die Durchmesser sind so gewählt, dass ringförmige Zwischenräume von etwa $^1/_2$ cm Breite bleiben, in welchen starke mit Guttapercha überzogene Verbindungsdrähte niedersteigen, an deren unteren Enden grosse Büschel von weichen Metallschnüren den Contact mit den benachbarten Belegungen vermitteln. Die Drähte der Zwischenräume 1, 3, 5, 7 vereinigen sich oberhalb der isolirten Flächenränder in einem passend geformten Zuleiter *A*, dasselbe ist auch bei den Drähten der Zwischenräume 2, 4, 6 der Fall, deren Zuleiter *B* überdies durch den Draht 8 mit dem innersten, durch den Draht *o* mit dem äussersten Beleg der Batterie verbunden ist. Der Zuleiter *A* wird beim Laden ebenso wie der Knopf der Leydener Flasche mit der Elektricitätsquelle verbunden, der Zuleiter *B* zur Erde abgeleitet. Sollte eine der Flaschen beim Gebrauche zerspringen, so kann der Rest der Batterie nach entsprechender Aenderung der Drahtverbindungen weiter benutzt werden. Eine solche Schachtelbatterie hat nahezu dieselbe Capacität, wie wenn die Flaschen in gewöhnlicher Weise neben einander zur Batterie verbunden wären. Es würde dies genau der Fall sein, wenn die Belegungen sich völlig umschliessende Leiter wären. Thatsächlich stellt sich durch die Wirkung an den freien Wänden der Belegungen die Gesammtcapacität bei der Ineinanderschachtelung etwas geringer heraus, als bei der gewöhnlichen Anordnung. So fand z. B. Freyberg die Capacität einer Schachtelbatterie von acht Flaschen mit $2^1/_2$ mm Glasdicke, deren grösste 53 cm Höhe und 20 cm Durchmesser hatte, im Mittel 5 Proc. kleiner, als bei Nebeneinanderstellung der Flaschen.

Als Nebenapparat gehört zur Leydener Flasche die Entladungsvorrichtung oder der Entlader (Fig. 189, a. f. S.). Er besteht aus zwei

gebogenen Messingstäbchen bc und $b'c$, welche bei c durch ein Charnier verbunden sind. Jeder der Arme des Ausladers endet mit einer kleinen Messingkugel (b und b') und ist ausserdem noch mit einem isolirten Handgriff (m und m') versehen. Man berührt die eine Belegung mit der einen Kugel und nähert die andere Kugel der gegenüberstehenden Belegung. Schon in einiger Entfernung springt ein Funken mit lebhaftem Licht und lautem Knall über.

Fig. 190 zeigt eine andere Form des Ausladers, mit nur einem Glasgriff m, welche noch mehr verbreitet ist als die zuerst besprochene. Auch hier ist c ein Charnier, um welches die beiden Arme cb und ca gedreht werden können, so dass man den Abstand der Kugeln a und b nach Bedürfniss grösser oder kleiner machen kann.

Fig. 189.

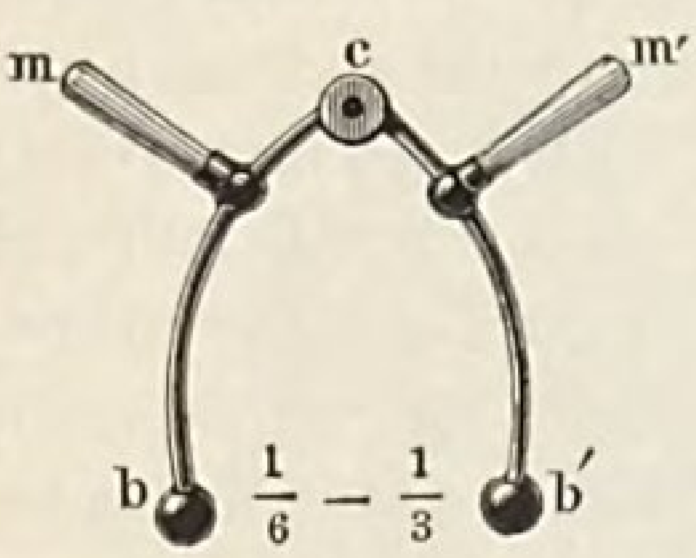


Fig. 190.

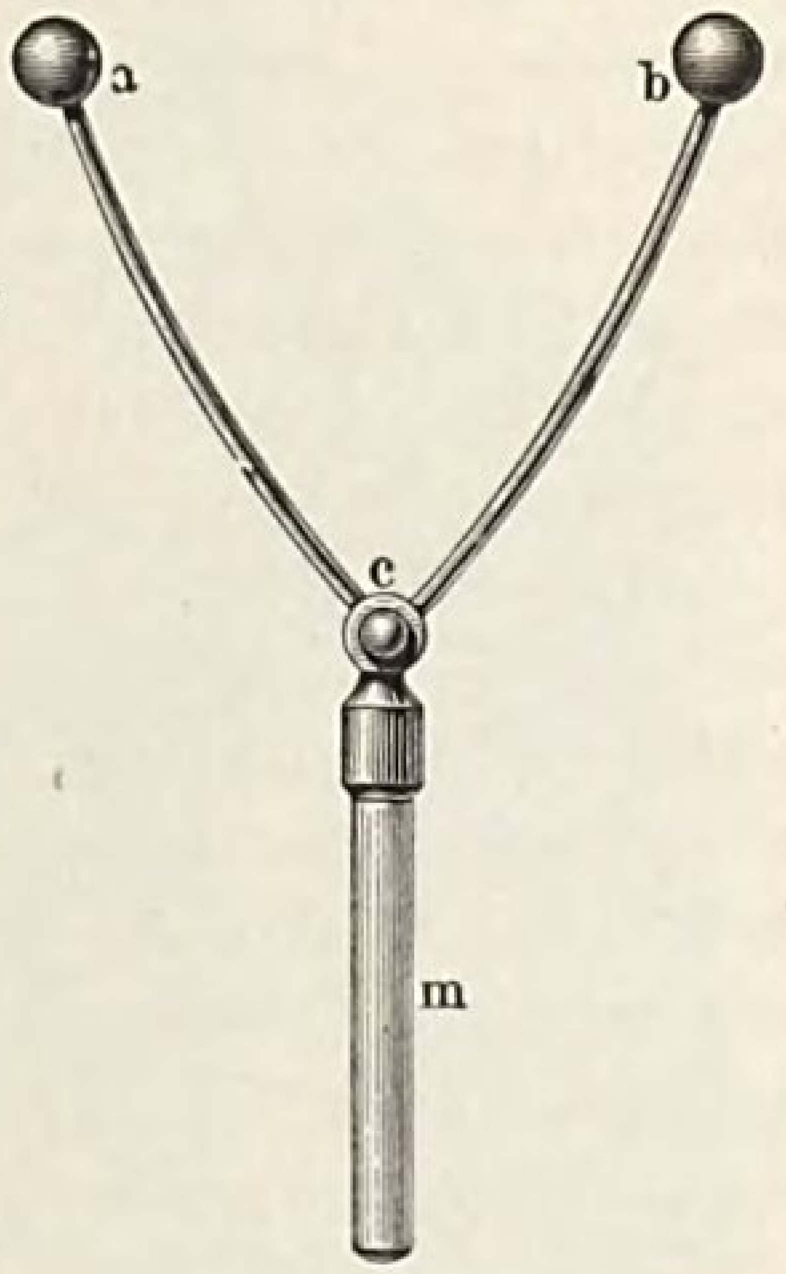


Fig. 191.

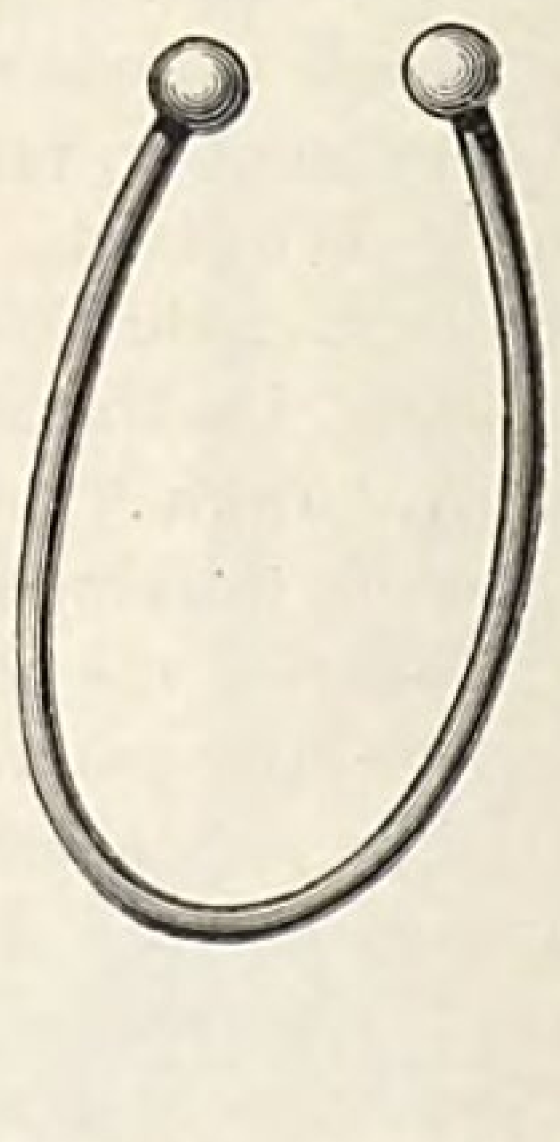
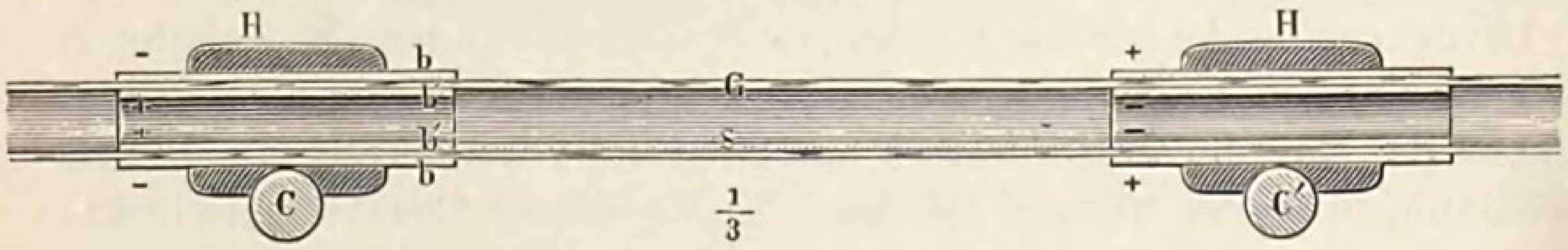


Fig. 192.



Den bequemsten und einfachsten Auslader, Fig. 191, bildet ein gegen 2 mm dicker, etwas über 1 m langer Kupferdraht, welcher mit einer starken Hülle von Guttapercha umgeben ist und dessen Enden mit Messingkugeln von ungefähr $1^1/_2$ cm Durchmesser versehen sind.

Eine doppelte Leydener Flasche abweichender Construction wird in Verbindung mit der Influenzmaschine gebraucht. Fig. 192 zeigt dieselbe im Längsschnitt, sie besteht aus einer beiderseits offenen Glasröhre G von Fingerweite, welche an zwei Stellen einige Centimeter von den Enden entfernt innen und aussen mit Belegen b, b' versehen ist. Die beiden inneren Belege sind durch einen Stanniolstreifen S verbunden

die äusseren durch Holzfassungen *H* bedeckt, durch deren Ausschnitte hindurch die Verbindung mit den beiden Conductoren *C*, *C'* der Influenzmaschine hergestellt wird, indem man einfach die ganze Vorrichtung quer auf die Conductoren auflegt. Ist *C* der negative, *C'* der positive Conductor, so ladet sich das Flaschenpaar in der angezeigten Weise, indem die Influenzelektricitäten der zweiten Art auf den inneren Belegen durch den Stanniolstreifen *S* hindurch neutralisirt werden.

Theorie und Anwendung der Leydener Flaschen werden wir besprechen, nachdem wir vorher die anderen Formen des Ansammlungsapparates beschrieben haben.

Franklin's Tafel, Condensatoren. Franklin, welcher 73
zuerst die Wirkung der Leydener Flasche richtig gedeutet hatte, gab dem Ansammlungsapparate die Form der nach ihm benannten Franklin'-

Fig. 193.

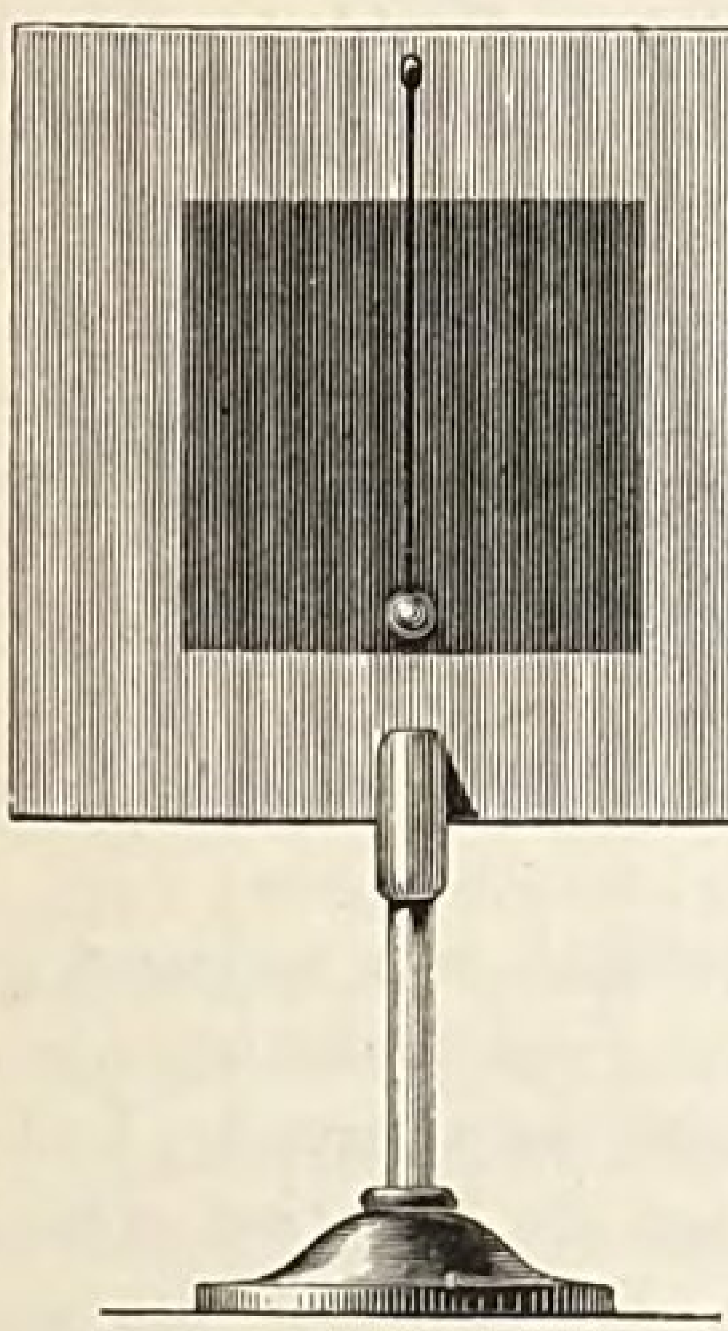
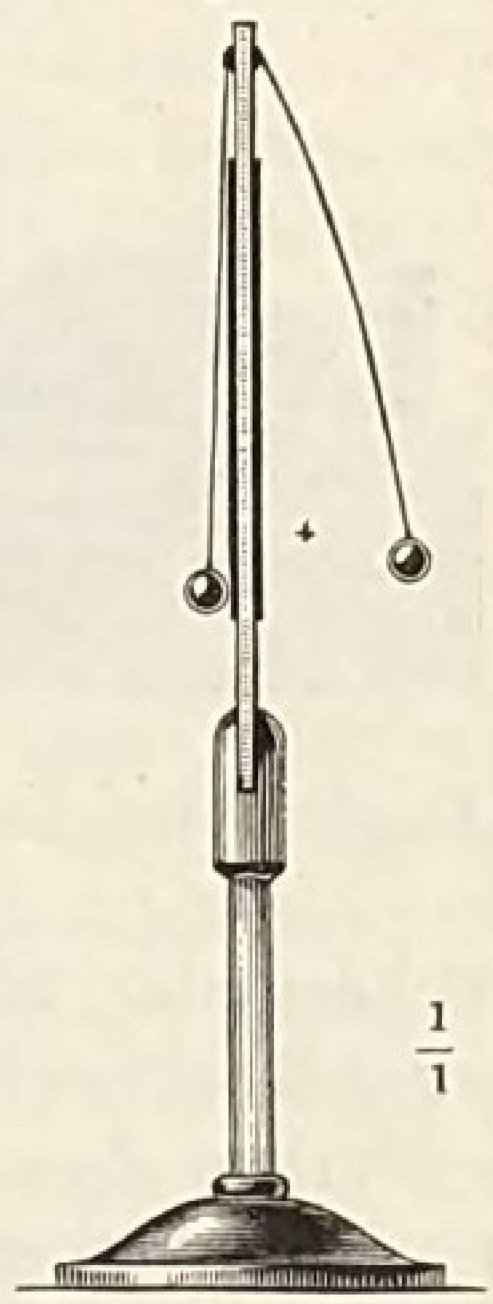


Fig. 194.

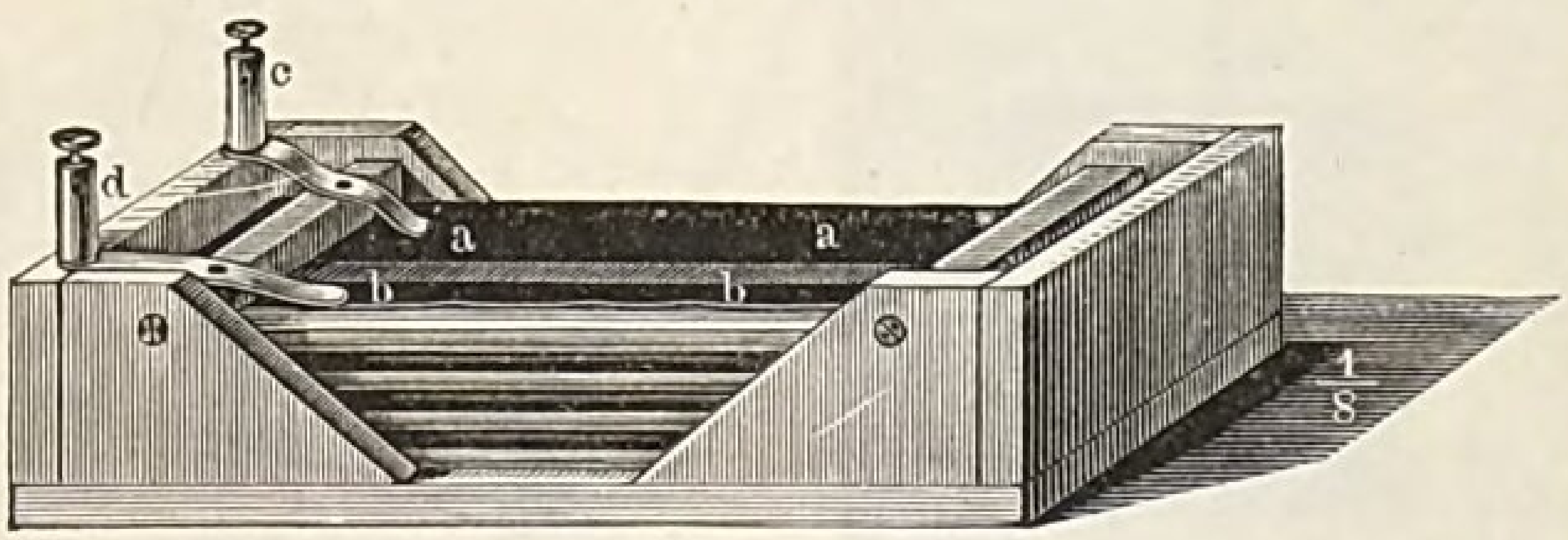


schen Tafel. Dieselbe besteht, wie Fig. 193 und 194 zeigt, aus einer Glastafel, deren beide Seiten mit Stanniol belegt sind, so dass noch ein Rand von circa 8 cm Breite frei bleibt. Der letztere wird zum Zwecke besserer Isolirung mit Schellackfirniss überzogen. Um die Tafel zu laden, kann man entweder eine der Belegungen mit dem positiven, die andere mit dem negativen Conductor verbinden, oder man leitet ein Beleg zur Erde ab und verbindet nur das andere mit der Elektricitätsquelle. Das abgeleitete Beleg hat natürlich das Potential Null, das gegenüberstehende hat, wenn positiv geladen, ein positives Potential. Befestigt man daher mit Wachs auf jeder Seite ein leichtes Pendel, wie die Figur zeigt, so hängt das auf der abgeleiteten Seite gerade herab, während das andere abgestossen wird. Berührt man die letztere Seite ableitend, so sinkt deren Potential auf Null und die gegenüberstehende Seite erhält ein negatives Potential.

Wir kommen auf diese allmälige Entladungsweise weiter unten noch zu sprechen.

Als eine Art Franklin'scher Tafel ist der Condensator von Wachstaffet, Fig. 195, anzusehen, welchen Stöhrer an dem später zu beschreibenden Funkeninductor angebracht hat. Ein ungefähr $2^1/_2$ m langer, 28 cm breiter Streifen von gut gefirnisstem Wachstaffet ist auf beiden Seiten in entsprechender Weise mit Stanniol belegt, welcher mit Schellackfirniss aufgeklebt wird. Dieser Streifen ist nun vielfach zusammengelegt und zwischen je zwei Lagen ein dünnes Brettchen von trockenem Tannenholz eingelegt. Das Ganze befindet sich dann in einem Kasten, welcher als Schieblade in das Gestell des bezeichneten Apparates eingeschoben wird. *a* ist das Ende der einen, *b* das über den Rand des Wachstaffets etwas übergreifende Ende der anderen Belegung; zwischen *a* und *b* bleibt natürlich ein hinlänglicher breiter Streifen Wachstaffet unbelegt. Ein federnder Kupferstreifen führt von dem Messingsäulchen *c* zur einen,

Fig. 195.



eine zweite Kupferfeder führt vom Messingsäulchen *d* zur anderen Belegung.

Dieser Condensator ist nur für Elektricität von äusserst geringer Spannung anwendbar, indem er schon nicht mehr ausreicht, um die von einer etwas starken Zamboni'schen Säule herrührende Ladung zu halten. Für solche stärkere Ladungen muss die Isolation vollständiger sein, man muss Condensatoren anwenden, bei welchen die isolirende Schicht durch ein Glimmerblatt gebildet wird. Um eine grössere Oberfläche zu erhalten, kann man dann mehrere solcher belegter Glimmerblättchen zu einer Batterie verbinden.

Macht man an einer Franklin'schen Tafel die Belege nicht fest, sondern richtet den Apparat so ein, dass sie sich abtrennen lassen, so entsteht der Condensator im engeren Sinne*). Fig. 196 (a. S. 236) zeigt einen solchen für gröbere Schulversuche. Ein Holzfuss trägt einen wohl isolirenden Glasstab, auf welchen oben eine runde, am Rande mit einem dickeren Wulste versehene Metallplatte (Condensatorplatte) *E F* aufgekittet ist. Auf diese Metallplatte wird eine Glas- oder Guttaperchaplatte *C D* gelegt, welche an allen Seiten die Metallplatte wenigstens um

*) Im weiteren Sinne werden alle Ansammlungsapparate, also auch die Leydener Flaschen, Condensatoren genannt.

2,5 cm überragen muss. Auf diese isolirende Platte endlich wird gerade der ersteren gegenüber eine zweite Metallplatte *AB* (Collectorplatte) aufgesetzt, welche gleichfalls mit einem isolirenden Glasgriffe versehen ist.

Die untere Platte kann man mit einem Häkchen versehen, an welchem ein elektrisches Pendelpaar (Hollundermarkkügelchen an leinenen Fäden) angehängt werden kann. Auf die obere Platte kann man einen oben hakenförmig gebogenen Draht befestigen, an welchem gleichfalls ein solches Pendelpaar hängt.

Lässt man nun mittelst eines Ausladers einige Funken vom Conductor der Elektrisirmaschine auf die Collectorplatte *AB* überschlagen, während die Condensatorplatte ableitend berührt ist, so divergiren die oberen Pendel, die unteren aber nicht. Entfernt man den Finger von der unteren Platte, um die obere ableitend zu berühren, so fallen die oberen zusammen und die unteren gehen aus einander. — Hat nach einiger Zeit ruhigen Stehenlassens der Apparat so viel Elektricität verloren, dass beide Pendelpaare nur noch schwach divergiren, so fahren sie noch einmal stark aus einander, wenn man an dem isolirenden Handgriff haltend die Collectorplatte *AB* von der Glasplatte *CD* abhebt, weil nun die bis dahin in den Platten gebunden gewesene Elektricität sich frei über das ganze leitende System, also auch über die Pendel, verbreiten kann.

Die feineren Condensatoren nach Volta's Construction werden meistens mit einem Elektroskop in Verbindung gebracht. Auf das Goldblattelektrometer wird eine Metallplatte aufgeschraubt, wie man Fig. 197 (a. f. S.) sieht. Diese Platte muss oben möglichst eben abgeschliffen und mit einer ganz dünnen Schicht von Schellackfirniss überzogen sein. Eine zweite auf dieselbe Weise präparirte Platte, welche mit einem isolirenden Stiele versehen ist, wird nun mit ihrer gefirnissten Fläche auf die andere gesetzt, so dass die beiden Metallplatten nur noch durch die dünne Firnissschicht getrennt sind, sonst aber so vollkommen wie möglich auf einander passen.

Man übersieht leicht, dass bei dieser Anordnung nur die Glasplatte des Apparates Fig. 196 durch eine dünne Schellackschicht ersetzt ist. Weil aber die isolirende Schicht so ausserordentlich dünn ist, die beiden Platten also einander sehr nahe stehen, so ist hier die gegenseitige Bindung eine sehr vollständige. Bringt man die untere Platte (Collectorplatte) mit einer schwachen Elektricitätsquelle, etwa mit dem einen Pol einer kleinen Zamboni'schen Säule (deren Beschreibung später folgt), in Berührung, während man die obere ableitend mit dem Finger berührt, so wird der Condensator ganz auf dieselbe Weise geladen, wie eine Leydener Flasche, deren innere Belegung mit dem Conductor der Elektrisirmaschine in Verbindung steht, während die äussere nicht isolirt ist. Der ganze Unterschied liegt nur darin, dass man das eine Mal mit einer Elektricitätsquelle von grosser, das andere Mal mit einer solchen von sehr geringer elektrischer Spannung zu thun hat.

Ist auf diese Weise der Condensator geladen worden, so wird der Finger von der oberen, die Elektricitätsquelle von der unteren Platte entfernt und dann die obere Platte abgehoben (und zwar möglichst parallel, damit die Berührung der beiden Platten in allen Punkten in demselben Momente aufgehoben wird); dadurch wird die bis dahin gebundene Elektricität der unteren Platte frei; ein Theil derselben verbreitet sich über die Goldblättchen und bewirkt eine Divergenz derselben, welche die Elektricitätsquelle direct entweder gar nicht oder doch nur in ungleich geringerem Maasse hervorzubringen im Stande war.

Fig. 196.

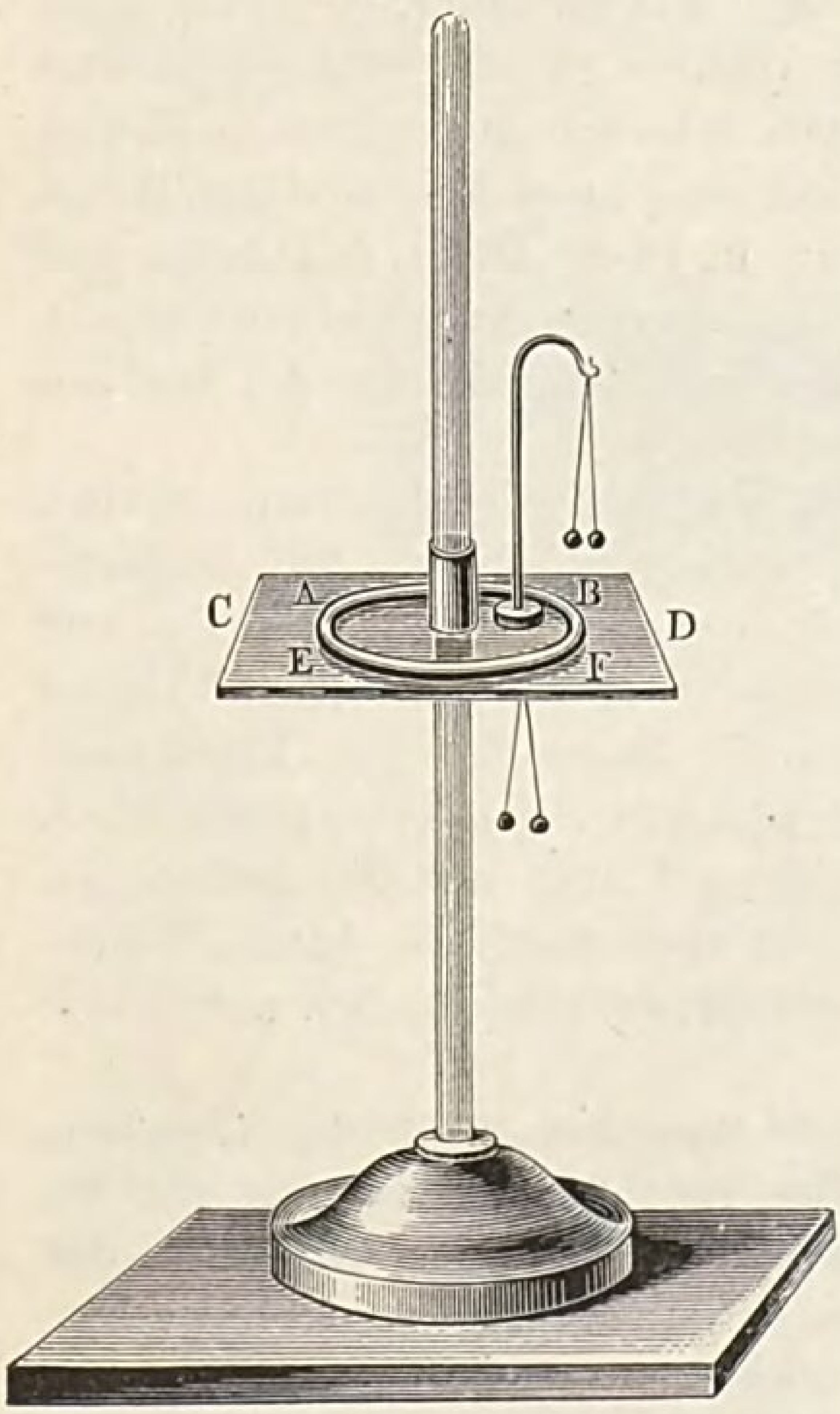
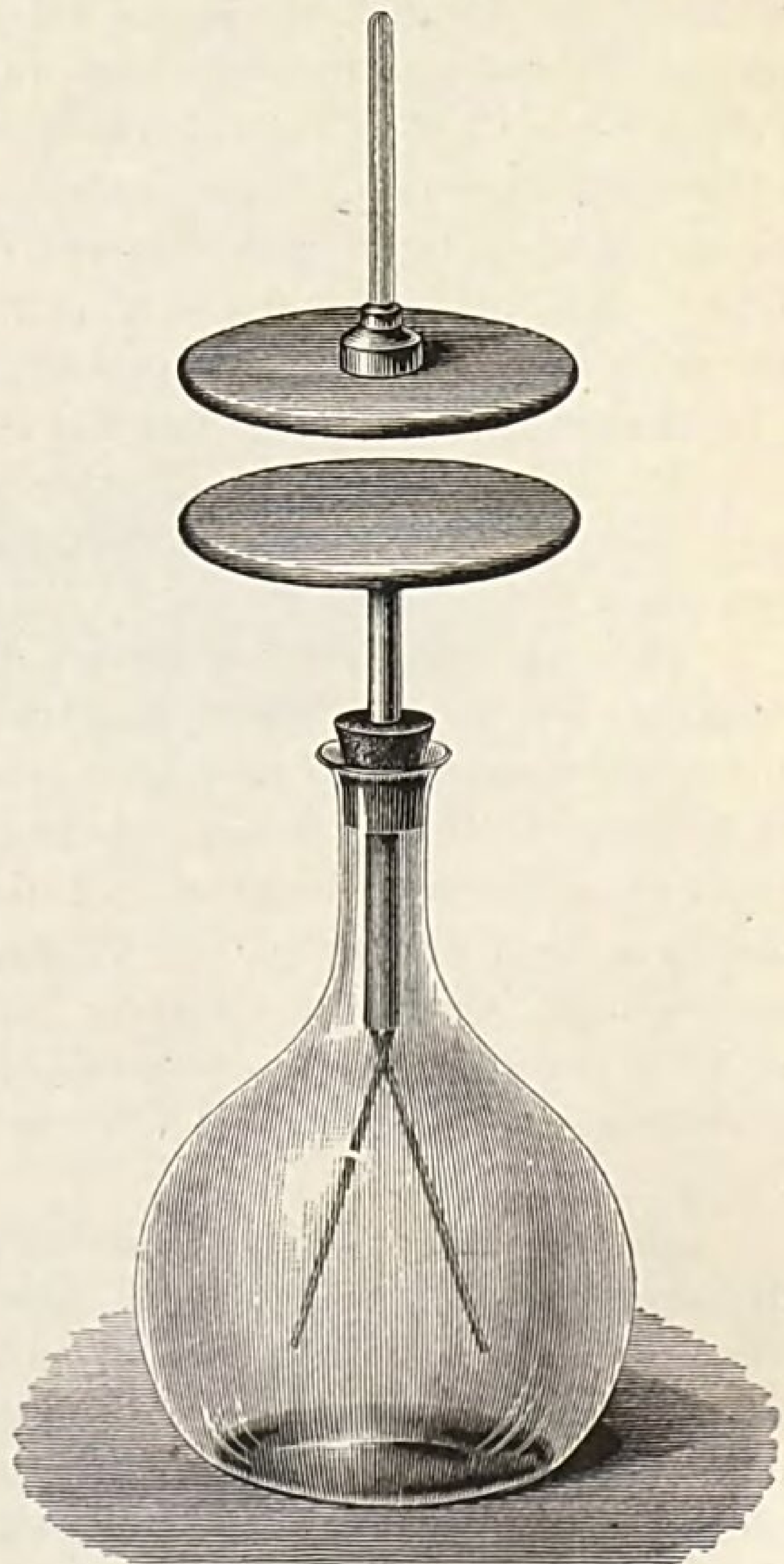


Fig. 197.



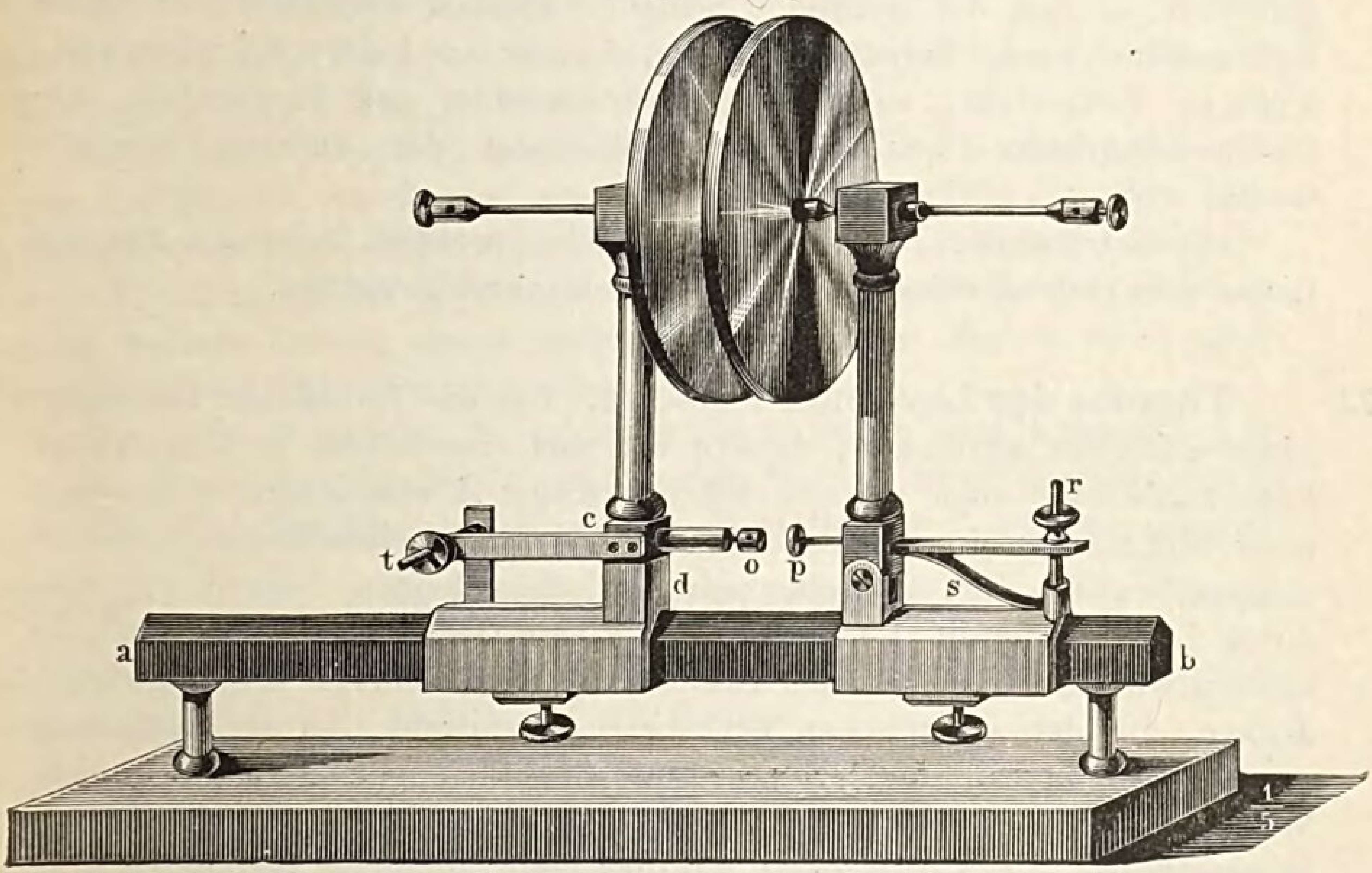
Da man die Condensatorplatte in der Combination mit dem Goldblattelektrometer nicht immer auf absolut gleiche Weise auf einander setzen kann, da man ebenso wenig eines vollkommen gleichmässigen Abhebens sicher ist, so haben die mit einer solchen Vorrichtung erhaltenen Resultate nicht die zu quantitativen Untersuchungen nöthige Genauigkeit. Um diese zu erlangen, gab Kohlrausch dem Condensator eine andere Einrichtung und brachte ihn statt mit einem Goldblattelektrometer mit

dem für Messungen weit geeigneteren Dellmann'schen Elektrometer, §. 70, in Verbindung *).

Nachdem Kohlrausch die Form des Condensators mehrmals abgeändert und verbessert hatte, blieb er bei einer Einrichtung desselben stehen, welche mit einigen constructiven Abänderungen in Fig. 198 dargestellt ist.

Auf einem durch zwei Messingstäbchen getragenen Stahlprisma *a b* sind, ähnlich wie bei einem Stangenzirkel, zwei genau passende Messinghülsen verschiebbar, von denen jede ein Säulchen von Holz trägt. In dem Kopf eines jeden dieser Säulchen ist ein Messingdraht mit Schellack eingekittet, welcher auf der einen Seite mit einer Klemmschraube, auf der anderen Seite aber mit einer Verstärkung endigt, in welche die

Fig. 198.



Condensatorplatte eingeschraubt werden kann, welche ungefähr 15 cm Durchmesser hat.

Da es besonders wichtig ist, dass die Condensatorplatten einander vollkommen parallel stehen, so ist die Vorrichtung getroffen, dass die eine der Platten (in unserer Figur die auf der rechten Seite) ein wenig mehr nach vorn oder nach hinten geneigt, die andere aber um eine verticale Axe etwas nach rechts oder links gedreht werden kann. Wie das erstere mit Hülfe der Schraube *r* und der Feder *s* geschieht, ist wohl aus der Figur ohne weitere Erläuterung verständlich. — Das Holzsäulchen links ist auf einem vierseitigen Metallstück *c* befestigt, welches mittelst

*) Pogg. Ann. Bd. LXXV.

einer gut geschnittenen Schraube in dem Messingstück *d* steckt. An *c* ist ein messingener Hebel angeschraubt, welchen man nur etwas vor- oder zurückzuschieben braucht, um die Säule nach der einen oder anderen Richtung um ihre verticale Axe zu drehen. Die Bewegung des Hebels geschieht mittelst der Schraube *t* und einer Spiralfeder, welche denselben nach vorn drückt.

Sind die Platten genau parallel gestellt, so ist es ferner von Wichtigkeit, dass man sie nicht über eine gewisse Grenze nähern und ihren Abstand reguliren kann. Es wird dies dadurch bewerkstelligt, dass bei Annäherung der Platten der Schraubenkopf *o* an das Plättchen *p* anstösst. Durch Drehen des Schraubenkopfes *o* kann man den Abstand der Condensatorplatten reguliren.

Die etwas über 2 mm dicken Platten dieses Condensators sind nicht gefirnisst, so dass die isolirende Schicht zwischen denselben nur durch Luft gebildet wird. Beim Gebrauch wird einer der beiden Schieber vollkommen festgestellt, so dass die Annäherung und Entfernung der Condensatorplatten nur durch Verschiebung des anderen bewerkstelligt wird.

Der Condensator ist, wie wir bald sehen werden, besonders für die Lehre vom Galvanismus von grosser Wichtigkeit geworden.

74 **Theorie der Leydener Flasche.** Um die Theorie der Leydener Flasche leichter abzuleiten, denken wir uns eine solche in Kugelform. Eine hohle oder auch massive leitende Kugel A vom Radius r sei von einer dünnwandigen concentrischen leitenden Kugelschale B vom Radius r' eingeschlossen. Den Zwischenraum zwischen beiden denken wir uns durch Luft ausgefüllt*). Durch eine kleine Oeffnung der Kugelschale können wir uns einen dünnen Draht isolirt zur inneren Kugel geführt denken, um den elektrischen Verkehr zu vermitteln. In der Rechnung vernachlässigen wir die daraus entspringenden geringen Störungen. Wir betrachten zunächst den häufigst angewendeten Fall, dass das äussere Beleg (die Kugelschale) mit der Erde ableitend verbunden und dem inneren Beleg eine Elektricitätsmenge $+E$ zugeführt werde. Nach früheren Erörterungen hat das Potential dieser $+E$ auf der Oberfläche von A den Werth $+\frac{E}{r}$, auf der Oberfläche von B, bevor dieselbe mit der Erde verbunden wird, den Werth $+\frac{E}{r'}$. Sobald wir dann B zur Erde ableiten, sinkt das Potential auf Null, indem positive Elektricität (Influenzelektricität zweiter Art) zur Erde strömt und negative Influenzelektricität erster Art auf B zurückbleibt. Die Menge der letzteren

*) Welchen Einfluss es hat, wenn statt der Luft ein anderes dielektrisches Medium, z. B. Glas, den Zwischenraum ausfüllt, soll später erörtert werden.

wollen wir zunächst mit E' bezeichnen. Das Potential der letzteren, wenn sie allein vorhanden wäre, würde $\frac{E'}{r'}$ betragen. Soll nun aber dieses Potential mitsammt dem anderen $+\frac{E}{r'}$ die Summe Null geben, so muss sein:

$$E' = -E. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

d. h. wenn in der Leydener Flasche das innere Beleg isolirt, das äussere zur Erde abgeleitet ist, so enthalten beide Belege gleiche Mengen entgegengesetzter Elektricitäten . 1)

Auf irgend einen um R vom Mittelpunkte entfernten Punkt ausserhalb der Flaschen betragen die beiden Potentiale $\frac{+E}{R}$ und $\frac{-E}{R}$ zusammen also Null; d. h. die an der Aussenseite abgeleitete Leydener Flasche wirkt nicht nach aussen 2)

Diese Sätze 1) und 2) lassen sich auf Leydener Flaschen beliebiger Form ausdehnen, wenn nur die eine Bedingung erfüllt ist, dass das äussere Beleg das innere vollständig umschliesst. Bei den gebräuchlichen Flaschen ist das allerdings nicht ganz der Fall. In Folge dessen ist die äussere Ladung etwas geringer als die innere und es wirkt auch der vorstehende Knopf nach aussen.

Für einen Punkt des Zwischenraumes zwischen den Belegen finden wir den Werth des Potentials auf folgende Weise. Steht derselbe um ϱ von dem Mittelpunkte ab, so ist sein Potential in Folge der inneren Ladung $= \frac{+E}{\varrho}$, in Folge der äusseren Ladung $= \frac{E'}{r'} = \frac{-E}{r'}$, denn das letztere Potential ist für alle Punkte innerhalb der Kugelscheibe ebenso gross wie auf derselben. Die Summe

$$+E\left(\frac{1}{\varrho} - \frac{1}{r'}\right)$$

giebt das gesuchte Potential. Dasselbe ist positiv, da $r' > \varrho$ ist. Das Potential auf und innerhalb des inneren Belegs A endlich ist nunmehr nach Ableitung des äusseren Belegs zur Erde gegeben durch

$$+E\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'}\right) = +E\frac{r'-r}{r\,r'}.$$

Dasselbe ist also auch positiv, aber kleiner als es vor der Ableitung war. Geht man also von aussen nach innen, so gelangt man aus dem umgebenden Raume mit dem Potential Null zunächst an das äussere Beleg, welches ebenfalls noch auf dem Niveau Null steht. Von da an in den Zwischenraum eindringend, finden wir ein allmälig steigendes Potential, welches am inneren Beleg den Werth $+E\frac{r'-r}{r\,r'}$ erreicht, welcher Werth dann für das Innere überall constant bleibt.

Da $r' - r$ die Dicke der isolirenden Zwischenschichte darstellt, und da andererseits das Product der Radien $r r'$ nahe dem Quadrate des mittleren Radius und deshalb proportional der Belegoberfläche ist, so folgt aus obigem Ausdrucke der Satz:

Die Potentialdifferenz zwischen dem inneren und äusseren Belege der Flasche ist bei gleicher Elektricitätsmenge der Dicke der isolirenden Schichte direct, der Belegoberfläche verkehrt proportional. 3)

Ist das Potential der Elektricitätsquelle $= V$ gegeben, so findet man die durch die Flasche aufzuspeichernden Elcktricitätsmengen im Inneren:

$$+ V \frac{r r'}{r' - r}$$

auf der Aussenseite

$$- V \frac{r r'}{r' - r}.$$

Die Elektricitätsmenge, welche man braucht, um das innere Beleg zum Potential 1 zu laden, das ist die Capacität der Flasche, ist demnach gegeben durch

$$C = \frac{r r'}{r' - r}.$$

Die Capacität der aussen abgeleiteten Flasche ist demnach direct proportional der Belegoberfläche und verkehrt proportional der Dicke der isolirenden Schichte (der Wandstärke) . 4)

Die potentielle Energie einer Flaschenladung, d. h. die Gesammtarbeit, die aufzuwenden ist, um eine Flasche in den geladenen Zustand zu versetzen, welche wiederum als Arbeitsleistung bei der Entladung in Form von mechanischer Energie, von Wärme oder anderen äquivalenten Wirkungen zum Vorschein kommen muss, können wir jetzt auf Grund der Erörterungen im §. 67 auf folgende Weise erhalten.

Die Potentialdifferenz zwischen dem inneren und dem äusseren Belege ist

$$= E \frac{r' - r}{r r'},$$

bei der Entladung der Flasche sinkt also das Potentialniveau von der Niveauhöhe

$$V = E \frac{r' - r}{r r'}$$

auf die Höhe Null herab. Die mittlere Fallhöhe der elektrischen Massen beträgt demnach

$$\frac{1}{2} E \frac{r' - r}{r r'},$$

welchen wir mit der fallenden Masse E zu multipliciren haben, um die potentielle Energie A der Ladung zu erhalten. Diese beträgt demnach:

$$A = {}^1/_2\, E^2\, \frac{r' - r}{r\, r'}.$$

Mit Rücksicht auf

$$V = E\, \frac{r' - r}{r\, r'}$$

und

$$C = \frac{r\, r'}{r' - r}$$

erhalten wir also die Beziehungen:

$$A = {}^1/_2\, E\, V \quad \ldots\ldots\ldots \quad \text{I)}$$

$$A = {}^1/_2\, \frac{E^2}{C} \quad \ldots\ldots\ldots \quad \text{II)}$$

$$A = {}^1/_2\, C\, V^2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad \text{III)}$$

Aus diesen Formeln lassen sich folgende Sätze ableiten:

Aus II und III:

Bei gleicher Capacität verhält sich die Ladungsenergie wie das Quadrat der Elektricitätsmenge, beziehungsweise wie das Quadrat des Potentials 5)

Aus I und II:

Bei gleicher Elektricitätsmenge verhält sich die Ladungsenergie direct wie das Potential, verkehrt wie die Capacität der Flasche . 6)

Aus I und III:

Bei gleichem Potential verhält sich die Ladungsenergie direct wie die Elektricitätsmenge, beziehungsweise wie die Capacität der Flasche 7)

Wir werden später die experimentelle Bestätigung dieser Sätze besprechen.

Bisher wurde angenommen, dass die Flasche bei der Ladung aussen abgeleitet, innen mit der Elektrisirmaschine verbunden sei. Man kann aber auch umgekehrt das äussere Beleg, nachdem es von der Erde isolirt worden, mit der Elektrisirmaschine und das innere Beleg mit der Erde verbinden. Durch eine ganz ähnliche Betrachtung wie die obige findet man in diesem Falle für die aufgespeicherten Elektricitätsmengen, das Potential und die Ladungsenergie etwas abweichende Werthe. Bezeichnen wir die äussere Ladung mit E', die innere mit E, das äussere Potential mit V', das innere mit V, die Radien wie früher mit r' und r, so erhält man zunächst für das Potential des inneren Belegs nach Ableitung zur Erde:

$$V = \frac{E'}{r'} + \frac{E}{r} = 0,$$

folglich:

$$E = -E' \frac{r}{r'},$$

das Potential des äusseren Belegs:

$$V' = \frac{E'}{r'} + \frac{E}{r'} = \frac{E'}{r'} - \frac{1}{r'} E' \frac{r}{r'} = E' \frac{r' - r}{r'^2}.$$

Die Ladungsenergie erhält in diesem Falle den Werth:

$$A_1 = \frac{1}{2} E'^2 \frac{r' - r}{r'^2},$$

daraus geht hervor, dass bei dieser Ladungsart die beiden Belege nicht gleich grosse entgegengesetzte Elektricitätsmengen aufspeichern, sondern dass das innere Beleg eine im Verhältniss von $r' : r$ kleinere Menge enthält. Das Potential des äusseren Belegs verhält sich zum vorigen des inneren Belegs wie $r : r'$ und ebenso verhält es sich mit der Energie.

Je geringer die Dicke $r' - r$ der isolirenden Schichte, desto weniger unterscheiden sich die beiden Ladungsarten von einander.

Man kann, was namentlich bei Anwendung der Influenzmaschine geschieht, eine Leydener Flasche aber auch so laden, dass man sie isolirt und dann das innere Beleg mit dem einen, das äussere Beleg mit dem anderen Conductor verbindet. Hierbei erlangt das eine Beleg ein positives, das andere ein negatives Potential. Es tritt dann in den obigen Formeln an Stelle des V die Potentialdifferenz $V_1 - V_2$. Die Ladung ist also gegeben durch

$$E = C\,(V_1 - V_2) \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 8)$$

wobei C die Capacität, V_1 das Potential innen, V_2 das Potential an der Aussenseite ist.

Für die Capacität einer kugelförmigen Leydener Flasche, deren isolirende Schicht aus Luft besteht, haben wir oben den einfachen Ausdruck

$$C = \frac{r\,r'}{r' - r}$$

abgeleitet. Setzen wir für die Dicke $r' - r$ der Isolirschicht den Buchstaben d und vertauschen $r\,r'$ durch das diesem Producte sehr nahe kommende Quadrat r^2, berücksichtigen endlich, dass die Oberfläche des Belegs auf einer Seite $= 4\,r^2 \pi = S$ ist, so erhalten wir für die Capacität, ausgedrückt durch die Oberfläche und Dicke:

$$C = \frac{S}{4\,\pi\,d} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 9)$$

Welche Ergänzung diese Formel für den Fall erfahren muss, dass die Isolirschicht nicht aus Luft besteht, soll später gezeigt werden.

Schwieriger zu berechnen ist die Capacität eines kreisförmigen Plattencondensators, weil die Elektricität auf einem solchen nicht gleichförmig vertheilt, sondern gegen den Rand angehäuft ist und

auch ein Theil derselben auf der Rückseite der Platten sich vorfindet. Die vollständige Formel von Kirchhoff für die Capacität der zur Erde nicht abgeleiteten Platte eines Plattencondensators lautet:

$$C = \frac{R^2}{4d} + \frac{R}{4\pi}\left[log\,\frac{16\pi\,(d+b)\,R}{e\,d^2} + \frac{b}{d}\,log\,\frac{d+b}{b} + 2\right] \quad . \quad . \quad 10)$$

worin R den Radius, d den Abstand, b die Dicke der Platten bedeuten.

Setzt man die Dicke $b = 0$, so erhält man die von Clausius berechnete Formel:

$$C = \frac{R^2}{4d} + \frac{R}{4\pi}\left[log\,\frac{17{,}68\,R}{d} + 2\right] \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 11)$$

welche nur durch den numerischen Werth der Coëfficienten von R etwas abweicht.

Vernachlässigt man die Ungleichheit der elektrischen Dichte, so kommt man auf den einfachen, aber nur angenähert richtigen Werth

$$C = \frac{R^2}{4d} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 12)$$

Nach Messungen von Jg. Klemencic*) stimmen die gemessenen Capacitäten mit den von Kirchhoff und (bei dünnen Platten) von Clausius berechneten Werthen sehr gut überein.

Die Capacität einer freistehenden kreisförmigen Platte beträgt nach Kirchhoff:

$$C = \frac{2R}{\pi};$$

die beobachtete Capacität ist in diesem Falle etwas kleiner.

Stufenweise Entladung der Leydener Flasche. Die Ent- 75
ladung der Flasche kann entweder eine plötzliche oder eine stufenweise sein. Der erstere Fall tritt ein, wenn man die beiden Belege durch einen guten Leiter verbindet, der letztere, wenn man an der auf eine isolirende Unterlage gestellten Flasche abwechselnd das äussere und das innere Beleg zur Erde ableitet. Während bei der plötzlichen Entladung ein starker Funken entsteht, dessen Natur später besprochen werden soll, entstehen bei der stufenweisen Entladung eine Reihe Funken von geringerer und allmälig abnehmender Stärke, bis endlich nach vielen solchen Entladungen die Flasche sich dem ungeladenen Zustande immer mehr nähert.

Die Mengen der Elektricitäten und die Höhen des Potentials, welche bei dieser stufenweisen Entladung auf den Belegen vorhanden sind, lassen sich wie folgt berechnen. Bezeichnen wir wie früher die Elektricitätsmengen innen und aussen mit E und E', die gleichzeitigen Potentiale

*) Wiener Akad. Ber. LXXXVI, 1882.

mit V und V', die Radien (der kugelförmig gedachten Belege) mit r und r', so gilt allgemein:

$$V = \frac{E}{r} + \frac{E'}{r'} \qquad V' = \frac{E}{r'} + \frac{E'}{r'}.$$

Ist die Flasche bei abgeleitetem äusserem Belege geladen worden, so ist:

$$V' = \frac{E}{r'} + \frac{E'}{r'} = 0$$

und daher $E = -E'$, wie bereits im vorigen Paragraphen erwähnt wurde. Aus der Gleichung

$$V = \frac{E}{r} + \frac{E'}{r'}$$

folgt:

$$E = r\,V - \frac{r}{r'}\,E'.$$

Die Elektricitätsmenge E besteht demnach aus zwei Theilen, dem Antheil

$$-\frac{r}{r'}\,E' = \frac{r}{r'}\,E,$$

welcher nur von dem Radienverhältniss und der äusseren Elektricitätsmenge abhängt, und dem Antheile $r\,V$, welcher von dem Potentiale auf dem inneren Belege abhängt. Da der Radius r zugleich die Capacität des inneren Belegs für den Fall vorstellt, dass dasselbe allein vorhanden sei, so bedeutet $E = r\,V$ zugleich die Elektricitätsmenge, welche auf dem inneren Belege vorhanden wäre, wenn es für sich allein und bis zum Potential V geladen wäre. Leitet man dieses innere Beleg zur Erde, während das äussere Beleg isolirt ist, so wird $V = 0$. Die Ladung des inneren beträgt demnach nur noch:

$$E_1 = -\frac{r}{r'}\,E' = \frac{r}{r'}\,E.$$

Abgeflossen ist die Menge $r\,V$. Diese Elektricitätsmenge wird, eben weil sie frei abfliessen kann, die freie Ladung der Flasche genannt. Es gilt also der Satz: Die freie Elektricitätsmenge auf dem inneren Belege einer aussen abgeleiteten Leydener Flasche, welche nach Isolirung des äusseren Belegs bei der Ableitung des inneren Belegs abfliesst, ist ebenso gross, wie wenn dieses Beleg allein vorhanden und bis zu demselben Potential geladen wäre. Die zurückgehaltene (gebundene) Ladung ist bei derselben Flasche stets ein constanter Bruchtheil der äusseren oder der früheren inneren Ladung.

Die Flasche befindet sich nunmehr genau in demselben Zustande, wie wenn sie von vornherein innen abgeleitet, aussen isolirt und mit der

Menge $E' = - E$ geladen worden wäre. Nach den Erörterungen des vorigen Paragraphen würde sie dann innen die Elektricitätsmenge

$$-\frac{r}{r'} E' = \frac{r}{r'} E$$

enthalten, wie oben gefunden wurde. Das Potential an der Aussenseite beträgt demnach jetzt:

$$V_1' = E' \frac{r' - r}{r'^2} = - E \frac{r' - r}{r'^2}.$$

Isolirt man nunmehr das innere Beleg und leitet das äussere zur Erde, so wird daselbst das Potential = Null, die Flasche kommt in denselben Zustand, wie wenn sie von vornherein bei abgeleitetem äusserem Belege innen mit der Elektricitätsmenge $E_1 = \frac{r}{r'} E$ geladen worden wäre. Folglich muss dann auch die äussere gebundene Ladung

$$E_1' = - \frac{r}{r'} E = \frac{r}{r'} E'$$

sein. Es geht also wiederum ein gleicher Bruchtheil der äusseren Ladung fort.

Fassen wir dieses zusammen, so kommen wir zu folgenden Ergebnissen:

Wenn die sonst isolirte geladene Flasche abwechselnd innen und aussen ableitend berührt wird, so sinkt jedesmal das Potential des berührten Belegs auf Null, während gleichzeitig auf dem anderen Beleg ein Potential mit entgegengesetztem Zeichen entsteht.

Nach jeder äusseren Berührung sind die Ladungen der beiden Belege entgegengesetzt gleich gross.

Die Ladungen jedes Belegs nehmen nach jeder Berührung desselben bis auf den Bruchtheil $\frac{r}{r'}$ derselben ab. Die auf einander folgenden Ladungen jedes Belegs bilden daher eine abnehmende geometrische Reihe mit dem Quotienten $\frac{r}{r'}$. Die stufenweise Entladung geht daher, unter sonst gleichen Umständen, desto langsamer vor sich, je näher $\frac{r}{r'}$ an 1, also je dünner die isolirende Schicht ist.

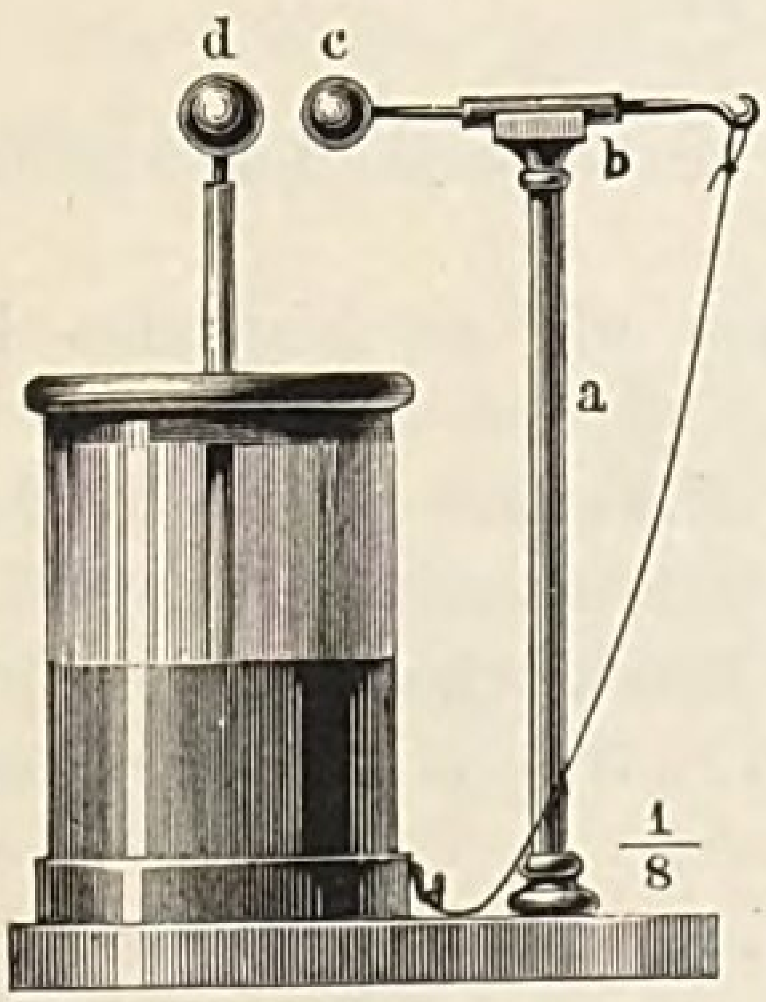
Hat die Flasche nicht die angenommene Form einer Kugel, so tritt an Stelle von $\frac{r}{r'}$ ein anderer Quotient, der überdies von der Natur des isolirenden Materials abhängt. Wird das innere Beleg vom äusseren nicht ganz umschlossen, oder stehen sich dieselben, wie bei der Franklin'schen Tafel, nur gegenüber, so sind die Elektricitätsmengen E und E'

nicht gleich gross, sondern stets die Ladung der abgeleiteten Seite die schwächere. Im Uebrigen gelten die obigen Sätze für Condensatoren jeder Form.

Wird eine Leydener Flasche mit abgeleitetem äusserem Belege sich selbst überlassen, so tritt eine ganz allmälige Entladung derselben ein. Für jeden kleinen Verlust an Elektricität, der vom Knopf der Flasche an die Luft stattfindet, geht eine entsprechende Menge der äusseren Ladung in die Erde über. Hierdurch erhält sich das Potential auf dem inneren Belege viel länger auf annähernd gleicher Höhe, als wenn dieses Beleg für sich allein einen zum nämlichen Potential geladenen Leiter bilden würde. Von dieser Dauerhaftigkeit des Potentials der Flasche macht man oft Anwendung, so z. B., wie oben erwähnt, beim Thomson'schen Quadrantenelektrometer.

76 **Die Lane'sche Maassflasche.** Wenn es sich darum handelt, relative Messungen der Ladungen einer grösseren Leydener Flasche oder einer Batterie von solchen anzustellen, so ist dazu die Lane'sche Maassflasche geeignet. Dieselbe besteht aus einer kleineren Leydener Flasche, deren Knopf *d*, Fig. 199, eine Metallkugel *c* in veränderlichem und messbarem Abstande gegenübersteht. Zwischen dieser Kugel und dem äusseren Belege ist in aus der Figur ersichtlicher Weise eine leitende Verbindung hergestellt. Wird die Flasche geladen, so tritt, sobald das Potential eine gewisse Höhe erreicht hat, eine Selbstentladung zwischen *d* und *c* ein. Da die Capacität dieselbe bleibt, so muss auch die Elektricitätsmenge, welche bis zum Moment der Entladung in die Flasche geströmt ist, jedesmal gleich gross sein, so lange nur der Abstand der Kugel *d* und *c* gleich gross bleibt. Nimmt man diese Menge als eine relative Einheit, so kann man nach derselben die Ladung einer grösseren Flasche oder Batterie auf eine der folgenden Weisen messen.

Fig. 199.

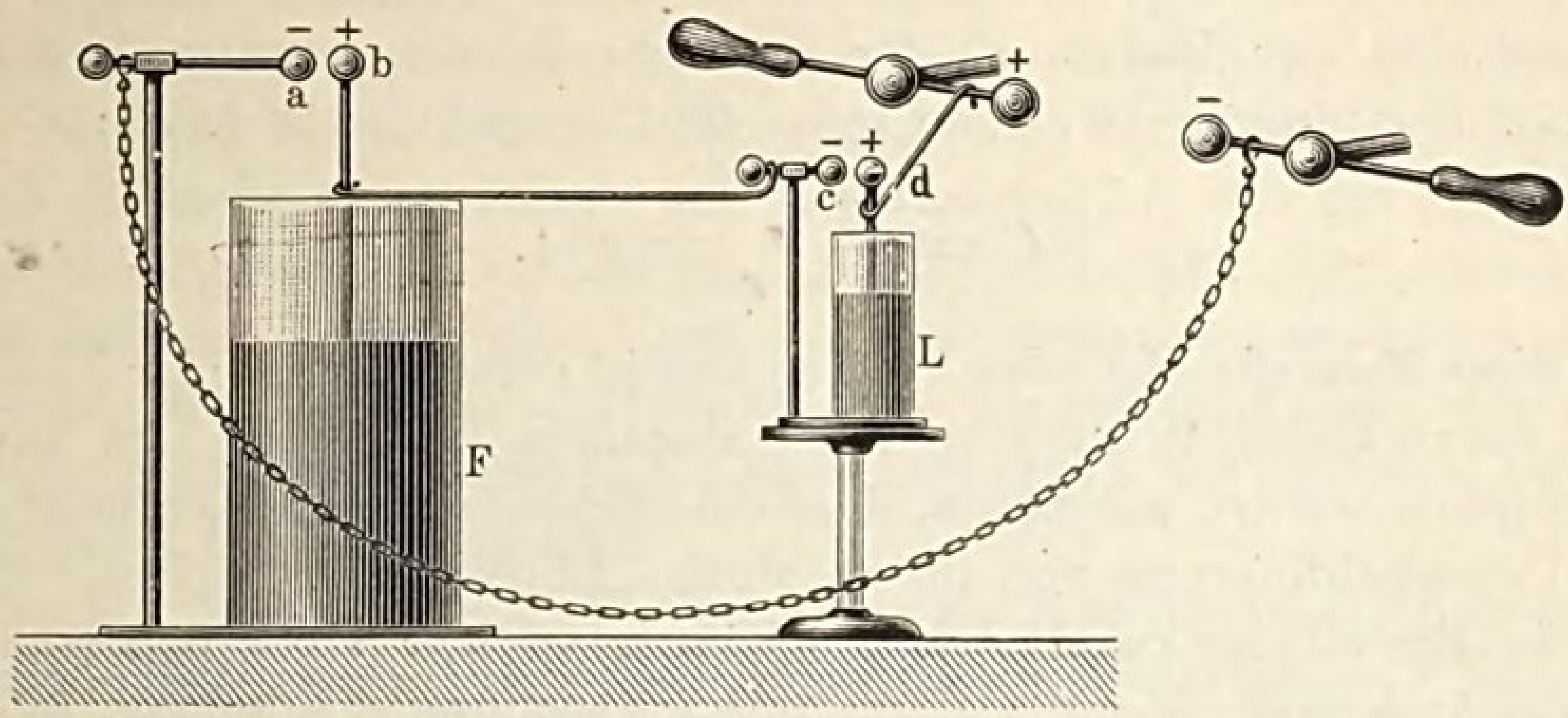


Man isolirt die Lane'sche Flasche *L*, Fig. 200, verbindet ihren Knopf *d* mit dem einen Conductor der Elektrisirmaschine (Influenzmaschine), ihr äusseres Beleg mit dem Knopfe des inneren Belegs der zu messenden Flasche *F*, deren äusseres Beleg zur Erde abgeleitet ist, mit welcher auch der andere Conductor der Maschine in Verbindung steht. Oder, was die gewöhnlichere Art des Versuches ist, man isolirt die zu messende Flasche oder Batterie, verbindet ihren Knopf mit dem Conductor der Maschine, ihr äusseres Beleg mit dem Knopfe der Lane'schen Flasche, deren äusseres Beleg zur Erde abgeleitet ist.

Fig. 201 zeigt diese letztere Anordnung. Bei der ersten Anordnung wird die Flasche *F* mit der abgestossenen Influenzelektricität des äusseren

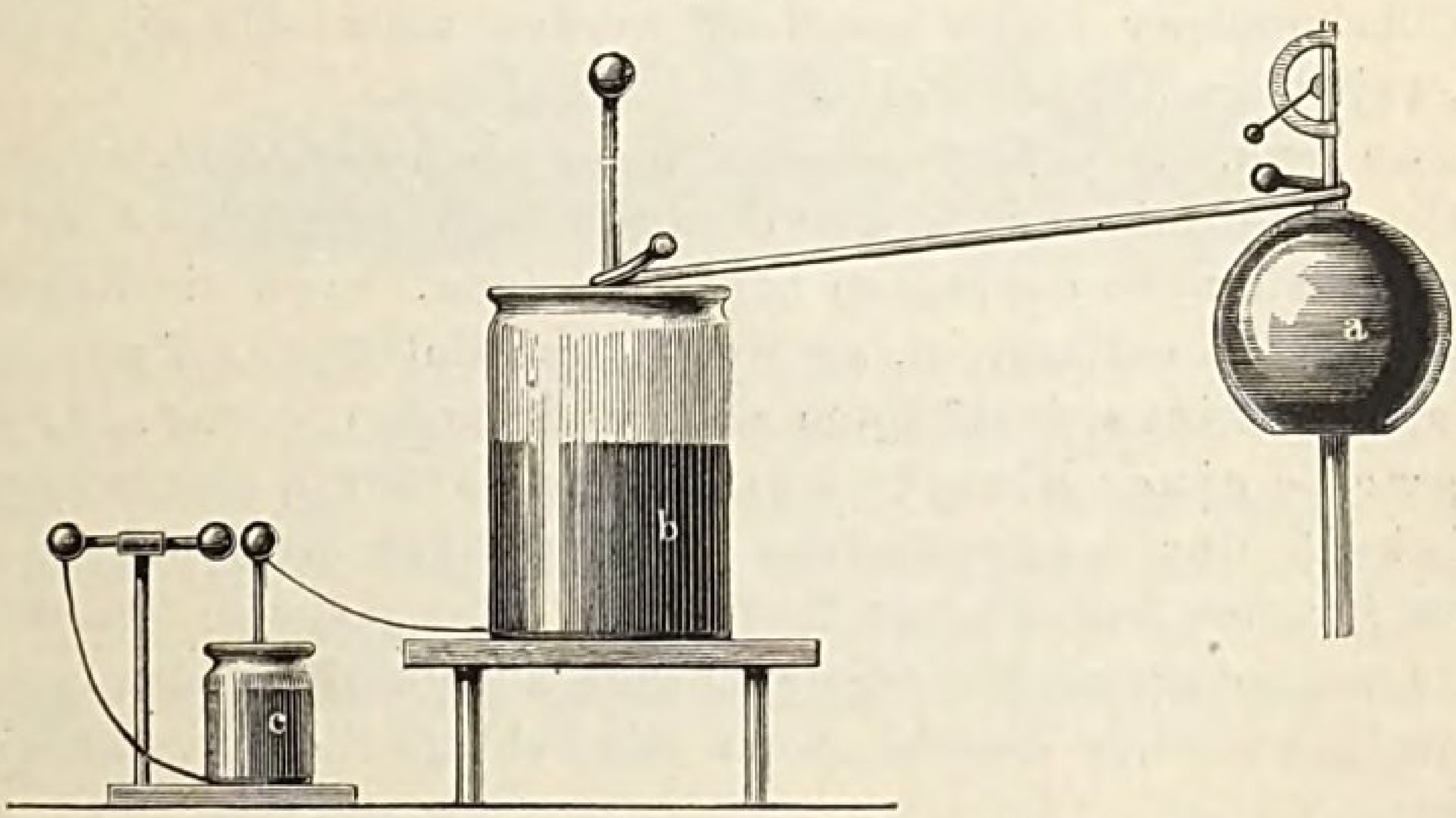
Belegs der Maassflasche geladen, bei der zweiten Anordnung wird umgekehrt die Maassflasche mit der abgestossenen Elektricität der Flasche *F* geladen. In beiden Fällen wird die Flasche *F* ebenso oft mit einer gleichen Menge Elektricität geladen, so oft die Maassflasche sich entladet.

Fig. 200.



Als ein Beispiel mag die angenäherte Bestimmung der Capacität einer grösseren Leydener Flasche oder Batterie dienen. Wir versehen dieselbe zu diesem Zwecke mit gleich grossen und gleich weit abstehenden Entladungskugeln, wie an der Maassflasche vorhanden sind (Fig. 200). Sowie man die Maschine, welche mit dem Knopfe *d* der Maassflasche verbunden ist, zu drehen beginnt, springen Funken zwischen *c* und *d*

Fig. 201.



über, welche wir zählen. Nach einer Anzahl solcher Funken entsteht ein starker Funken zwischen *a* und *b*.

Setzt man das Experiment fort, so beobachtet man, dass die Anzahl *n* der Funken der Maassflasche *L*, welche auf einen Funken der zu messenden Flasche *F* treffen, nahezu constant ist. Da nun zwischen den gleichen Kugelpaaren der Funken dann entsteht, wenn ihre Potentialdifferenz die gleiche Höhe erreicht hat, so folgt, dass die Flasche *F* die *n*fache Elektricitäts-

menge nöthig hatte, um das gleich hohe Potential zu erreichen, d. h. dass die Capacität derselben n mal so gross, wie jene der Maassflasche L ist.

Um diese Angabe auf absolutes Maass zu reduciren, müssten wir als Maassflasche eine solche verwenden, deren Capacität selbst nach absolutem Maasse bekannt ist. Eine solche wäre z. B. eine aus zwei Kugelschalen mit dazwischen liegender Luftschicht bestehende Flasche. Angenommen, der Radius r' der äusseren Schale betrage 19 cm, der Radius r der inneren 16 cm, so wäre die Capacität nach §. 74:

$$C = \frac{r\,r'}{r' - r} = 101.$$

Giebt diese Maassflasche zehn Funken auf je einen Funken der Flasche F, so ist deren Capaität nahe = 1010 absoluten Einheiten. Im nächsten Paragraphen werden wir hören, dass eine Schlagweite von 5 mm ungefähr einer Potentialdifferenz von 55 absoluten Einheiten entspricht. Hatten also die Entladungskugeln diese Distanz, so war $V = 55$, somit die Elektricitätsmenge $E = V\,C = 5555$ absoluten Einheiten, die Entladungsenergie $A = \frac{1}{2}\,V^2\,C = 152\,762$ Erg $= \frac{1}{641}$ Kilogrammmeter. Diese Methode liefert deshalb nur angenähert richtige Werthe, weil sich zugleich mit der Flasche L auch der Maschinenconductor und mit der Flasche F zugleich die äussere Belegung von L entladet und weil die später zu besprechenden Entladungsrückstände störend einwirken*).

77 **Schlagweite der Leydener Flasche.** Die Distanz, bis auf welche dem Knopfe der Leydener Flasche ein mit dem äusseren Beleg leitend verbundener Knopf genähert werden muss, bis die Entladung erfolgt, heisst die Schlagweite.

Lane fand, dass bei gleichmässigem Drehen der Elektrisirmaschine, deren Conductor mit dem Knopfe d der Maassflasche leitend verbunden ist, die Entladungen doppelt so häufig erfolgen, wenn die Kugel c nur 1 mm weit von d entfernt ist, als wenn diese Entfernung 2 mm beträgt. Harris und Riess bestätigten dies und fanden ferner, dass die Schlagweite einer Flasche oder einer Batterie überhaupt der Dichtigkeit der angehäuften Elektricität proportional ist, dass also für eine Batterie von 2, 3, 4 etc. ganz gleichen Flaschen eine 2-, 3-, 4 mal so grosse Elektricitätsmenge zugeführt werden muss, als einer einzigen solchen Flasche, wenn die Schlagweite unverändert bleiben soll.

Um die Schlagweite zu messen, bedient sich Riess des Funkenmikrometers, dessen wesentliche Einrichtung durch Fig. 202 erläutert wird. Jede der Messingkugeln A und B ist auf eine von einer Glassäule getragene Messingfassung aufgesetzt, welche mit einem horizon-

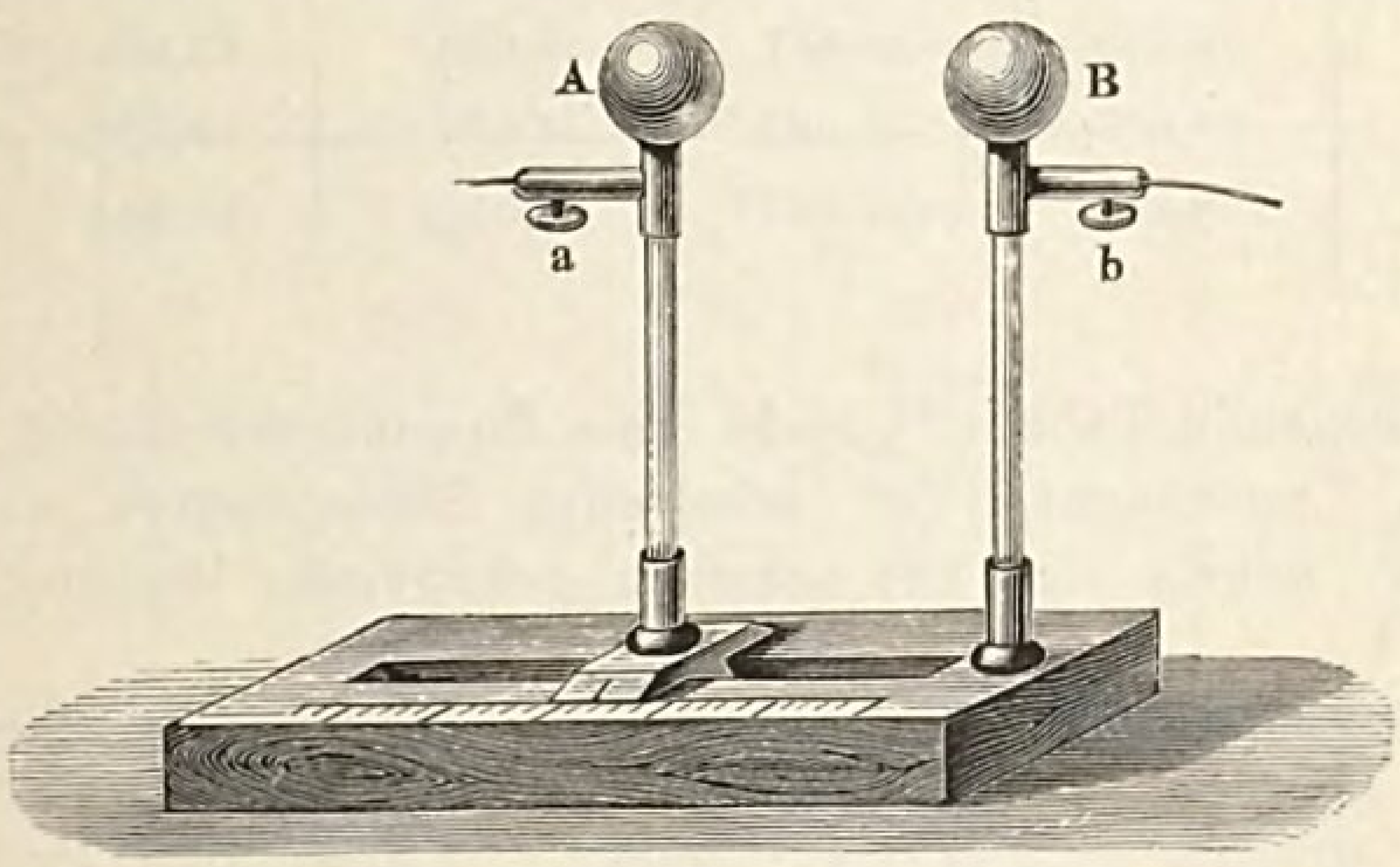
*) E. Mach, Ueber die Grundbegriffe der Elektrostatik. Zeitsch. d. elektrot. Vereins in Wien, 1883.

talen Arm zum Einklemmen von Drähten versehen ist. Der eine Glasstab mit der Kugel B steht fest, der andere steht auf einem Schlitten, durch dessen Verschiebung der Abstand der Kugeln beliebig verändert werden kann. Bei dem Riess'schen Funkenmikrometer wird die feinere Verschiebung des Schlittens, welcher die Kugel A trägt, durch eine Mikrometerschraube vermittelt.

Die Versuche wurden in folgender Weise angestellt. Die Kugel A wurde in einer bestimmten Entfernung d von der Kugel B festgestellt, alsdann A durch einen Draht mit der äusseren, B mit der inneren Belegung der Batterie in Verbindung gesetzt und dann die Batterie nach dem im vorigen Paragraphen besprochenen Verfahren mittelst der Maassflasche geladen, es wurde also beobachtet, wie viel (q) Funken der Maassflasche überspringen mussten, bis eine Entladung der Batterie zwischen den Kugeln A und B erfolgte.

Neuere Versuche von W. Thomson, Baille und Anderen, bei welchen nicht bloss relative Messungen der Potentialdifferenz vorgenom-

Fig. 202.



men, sondern dieselben auf absolute Einheiten des Cent.-Gr.-Sec.-Systems reducirt wurden, ergaben, dass diese Proportionalität nicht genau besteht. Ausserdem hängt die Schlagweite noch von der Krümmung der Elektroden, beziehungsweise dem Durchmesser der Kugeln ab, ferner von der Oberflächenbeschaffenheit derselben, sowie vom Druck und dem Feuchtigkeitsgehalte der Luft. Sie ist ausserdem in verschiedenen Gasen verschieden gross.

Die Versuche von Baille sind in der Tabelle auf folgender Seite mitgetheilt.

Die mit * bezeichneten Werthe sind als Maxima des Potentials für dieselbe Schlagweite hervorgehoben.

In der mit ∞ überschriebenen Columne sind die Potentiale aufgeführt, welche zu einer Entladung zwischen zwei Platten nöthig waren, deren eine eben, deren andere ganz wenig convex war. Die Zahlen dieser Columne lassen sich nach Baille durch das Gesetz

$$V^2 = 10\,500\,(l + 0{,}08)\,l,$$

nach Chrystal durch das einfachere

$$V = 4{,}997 + 99{,}595\, l$$

ausdrücken, wo V das Potential in absoluten Einheiten, l die Schlagweite in Centimetern bedeuten. Nach Baille ist bei gleicher Schlagweite zwischen zwei Kugeln die Potentialdifferenz am grössten, wenn die Kugeln gleich gross sind. Ferner giebt bei gleicher Schlagweite eine bestimmte Kugelgrösse ein Maximum der Potentialdifferenz, wie aus der Tabelle zu ersehen ist.

Schlagweite	Durchmesser der Kugeln				
cm	∞	6 cm	1 cm	0,35 cm	0,1 cm
0,1	14,670	14,783	15,250	16,042	16,103*
0,2	25,510	25,586	26,784	27,129*	21,910
0,3	35,352	36,124	37,322*	36,287	24,124
0,4	45,089	45,667	46,559*	41,420	26,303
0,5	54,467	55,062 *	54,659	49,210	29,997
1,0	105,494	112,943 *	83,046	59,491	36,238

Nachfolgende Tabelle*) giebt eine Zusammenstellung der von verschiedenen Experimentatoren erhaltenen Schlagweiten und Potentialdifferenzen, welche sich auf schwach gekrümmte Elektroden beziehen:

Schlagweite	Potentialdifferenz nach				
cm	Thomson	de la Rue und Müller	Macfarlane	Baille	Chrystal
0,01	2,33	—	—	3,16	—
0,05	7,28	7,69	7,48	8,71	—
0,10	13,30	14,47	11,56	14,64	—
0,30	—	34,44	25,56	35,35	—
0,60	—	—	45,61	64,81	55,00

Bei grösseren Schlagweiten nimmt die Potentialdifferenz viel weniger rasch zu als die Schlagweite. So ist z. B. nach Mascart die relative Stärke des Potentials für Schlagweiten zwischen 5 bis 13 cm folgende:

*) Aus G. Wiedemann, Lehre von der Elektricität, IV. Bd., 2. Abth., S. 658, entnommen.

Schlagweite	Potentialdifferenz	Schlagweite	Potentialdifferenz
5	17,3	10	21,7
6	18,5	11	22,1
7	19,6	12	22,5
8	20,5	13	23,3
9	21,1		

Den Einfluss des Druckes, unter dem die Luft steht, hat Macfarlane studirt, er erhielt für eine Schlagweite von 0,5 cm folgende zusammenhängende Werthe vom Druck und Potentialdifferenz*).

Luftdruck in Millimetern Quecksilber	Potentialdifferenz	Luftdruck in Millimetern Quecksilber	Potentialdifferenz
20	3,23	200	14,10
40	4,37	303	18,71
80	7,00	406	23,58
100	8,48	509	27,73
120	9,76	612	32,57
140	10,84	685	36,07
180	13,19		

Diese Zahlen fügen sich dem Gesetze:

$$V = 0{,}04579 \sqrt{p^2 + 202{,}9\, p}.$$

Derselbe Autor hat die relativen Höhen der Potentialdifferenzen gemessen, welche in verschiedenen Gasen zu einer Schlagweite von 0,5 cm gehören. Er fand für

Luft	1
Kohlensäure . .	0,951
Sauerstoff . . .	0,930
Wasserstoff . .	0,634

Da eine vorausgehende Erhitzung der Elektroden zur Folge hat, dass dann die Potentialdifferenz näher proportional der Schlagweite ist, als bei nicht erhitzten Elektroden, so vermuthet Macfarlane, dass die condensirten Gasschichten der Entladung einen Uebergangswiderstand ent-

*) Wiedem. Beiblätter III, S. 432.

gegensetzen. Versuche über die Schlagweite in isolirenden Flüssigkeiten scheinen diese Vermuthung zu unterstützen.

Nach den Versuchen von Riess ist die Schlagweite der Batterien von der Natur des Schliessungsbogens unabhängig. Bei gleicher Ladung fand er die Schlagweite einer Batterie gleich, mochte nun der Schliessungsbogen nur durch einen kurzen dicken Kupferdraht oder durch einen langen dünnen Platindraht gebildet oder mochte endlich eine mit Wasser gefüllte Glasröhre in den Schliessungsbogen eingeschaltet sein.

Während also die Schlagweite durch die Natur des Schliessungsbogens nicht alterirt wird, hat letztere auf die Stärke des Funkens einen grossen Einfluss. Eine Batterie von fünf Flaschen gab bei einer Schlagweite von 3 mm durch einen kurzen dicken Kupferdraht entladen einen hellglänzenden Funken mit schmetterndem Knalle, während der Funken nur schwach war, als bei gleicher Ladung und gleicher Schlagweite ein langer dünner Platindraht als Schliessungsbogen angewendet wurde. Bei Einschaltung einer Wasserröhre war der Funken kaum merklich.

78 **Entladungsrückstand und Residuum.** Wenn die Batterie in der Schlagweite entladen wird, so bleibt noch eine merkliche Ladung zurück, welche bei grösserer Annäherung der Kugeln einen zweiten Entladungsfunken giebt. Man kann sich von dieser Thatsache leicht schon durch die Maassflaschen überzeugen. Man stelle die Kugeln der Maassflasche etwa 4 mm aus einander und lade bis zum Ueberspringen des Funkens; nähert man alsdann die Kugeln noch weiter, so wird alsbald ein zweiter Funken überspringen.

Riess hat gezeigt, dass die Elektricitätsmenge, welche bei der Entladung der Batterie in der Schlagweite verschwindet, immer in demselben Verhältniss zur ganzen Ladung stehe, mag nun der Schliessungsbogen durch kurze dicke oder durch lange dünne Metalldrähte gebildet sein. Nach den Versuchen von Riess verschwindet nämlich bei der Entladung in der Schlagweite 0,846 oder $^{11}/_{13}$ der ganzen Ladung, so dass nur $^{2}/_{13}$ derselben zurückbleiben.

Nach dieser Thatsache lässt sich leicht der Vorgang bei der gewöhnlichen Entladung ermitteln, bei welcher eine mit der äusseren Belegung in Verbindung stehende bewegliche Kugel dem festen Knopfe der inneren Belegung bis zur Berührung genähert wird. Wenn die bewegliche Kugel in die Schlagweite, welche wir mit d bezeichnen wollen, gekommen ist, so verschwinden $^{11}/_{13}$ der Ladung, es bleiben $^{2}/_{13}$ zurück; es kann erst wieder eine Entladung stattfinden, wenn die bewegliche Kugel bis auf $^{2}/_{13}\,d$ genähert ist, bei welcher Entfernung nun abermals $^{11}/_{13}$ der noch übrigen Entladung verschwinden; eine dritte Ladung erfolgt, wenn die bewegliche Kugel auf $(^{2}/_{13})^2 d$ genähert ist etc. Beträgt z. B. die ursprüngliche Schlagweite 3 m, so erfolgen die Entladungen bei folgenden Entfernungen:

3,00 0,46 0,07 0,011 mm,

bei welchen schon die dritte kaum mehr von der Berührung zu unterscheiden ist. Bei dem gewöhnlichen Entladungsverfahren wird also der Schliessungsbogen von mehreren Entladungen ergriffen, die rasch nach einander stattfinden.

Bei der Entladung in der Schlagweite verschwindet also eine so bedeutende Menge von Elektricität, dass nicht etwa eine geringe Annäherung der Kugeln eine zweite Entladung zur Folge hat, sondern dass die Schlagweite auf $^{2}/_{13}$ der ursprünglichen reducirt wird. Dass eine so grosse Menge von Elektricität, dass nämlich $^{11}/_{13}$ der ganzen Ladung verschwinden, scheint darauf hinzudeuten, dass auch die Entladung in der Schlagweite eine successive ist; durch den Uebergang der ersten Elektricitätsmenge wird die Luft verdünnt, und dadurch der Uebergang neuer Elektricitätsmengen möglich gemacht, welche nicht hätten übergehen können, wenn der zu überwindende Widerstand nicht durch die Verdünnung der Luft vermindert worden wäre. Der Uebergang der Elektricität dauert fort, bis die Ladung der Batterie so schwach geworden ist, dass bei der constanten Entfernung der Kugeln trotz des wegen der verdünnten Luft geringen Widerstandes kein Funken mehr übergehen kann. Hat nun die Luft zwischen den Kugeln ihre gewöhnliche Dichtigkeit wieder erlangt, so ist nun eine bedeutende Annäherung der Kugeln nöthig, um eine abermalige Entladung möglich zu machen. Bei der Entladung in der Schlagweite wird also ihre Elektricität successiv neutralisirt.

Ein Beweis für diese successive Entladung ist der Umstand, dass der Rest der Entladung viel bedeutender bleibt, wenn schon die erste übergehende Elekricitätsmenge eine Unterbrechung des Schliessungsbogens veranlasst, wie dies z. B. der Fall ist, wenn ein dünner, in den Schliessungsbogen eingeschalteter Draht durch den Entladungsschlag geschmolzen wird, ein Fall, den wir später noch genauer betrachten werden.

Auch die Einschaltung eines relativ schlechten Leiters, z. B. einer Wassersäule, erhöht den Rückstand, so dass die entladene Menge nur den Werth 0,625 erreicht.

Mit dem Rückstande, welcher bei Entladungen in der Schlagweite erhalten wird, darf man nicht verwechseln jene rückständige Ladung, welche eine Leydener Flasche zeigt, wenn sie nach einer Entladung durch vollständige Berührung eine Zeit sich selbst überlassen bleibt.

Man bemerkt dann, dass sie, obwohl vorhin vollständig entladen, neuerdings eine wenn auch relativ schwache Ladung annimmt. Diese wird nach R. Kohlrausch als Flaschenresiduum bezeichnet. Ebenso wie das Wiederkehren der Residuumsladung lässt sich das Verschwinden derselben beobachten. Unmittelbar nach raschem Laden einer Flasche verliert dieselbe nicht bloss durch Verlust an die Luft, sondern noch ausserdem an Potential, welches erst dann constant zu werden beginnt, wenn die Flasche gewissermaassen gesättigt ist.

Früher erklärte man diese Erscheinung einfach dadurch, dass man annahm, die entgegengesetzten Elektricitäten dringen allmälig in das Glas ein. Nach Entladung der Belege ströme dieselbe theilweise wieder auf die letzteren zurück. Nach neuerer Ansicht wird das dielektrische Medium durch die Influenz in einen Zustand von Polarisation versetzt, indem in jedem Molecüle desselben die Scheidung der Elektricitäten erfolgt. Nach der Entladung wirkt dann das polarisirte Dielektricum influenzirend auf die Belege. Eine Entscheidung zwischen beiden Erklärungen, welche vielleicht beide richtig sind, ist noch nicht erfolgt. Dass das Residuum im Glase seinen Sitz hat, lässt sich an einer Flasche zeigen, deren Belegungen man wegnehmen kann. Eine solche Flasche ist Fig. 203 dargestellt; in das Blechgefäss Fig. 204 wird nämlich zuerst das Glasgefäss Fig. 205 und in dieses endlich das die innere Belegung bildende Blechgefäss Fig. 206 gesetzt. Nachdem man diese Flasche geladen hat, nehme man die innere Belegung heraus und entlade sie vollständig. Dann hebe man das Glasgefäss aus der äusseren Belegung und nehme

Fig. 203.



Fig. 204.



Fig. 205.



Fig. 206.



auch dieser alle ihre Elektricität. Setzt man nun das Glas wieder in die äussere Belegung und die innere in das Glas, so findet man, dass die Flasche noch zum Theil geladen ist.

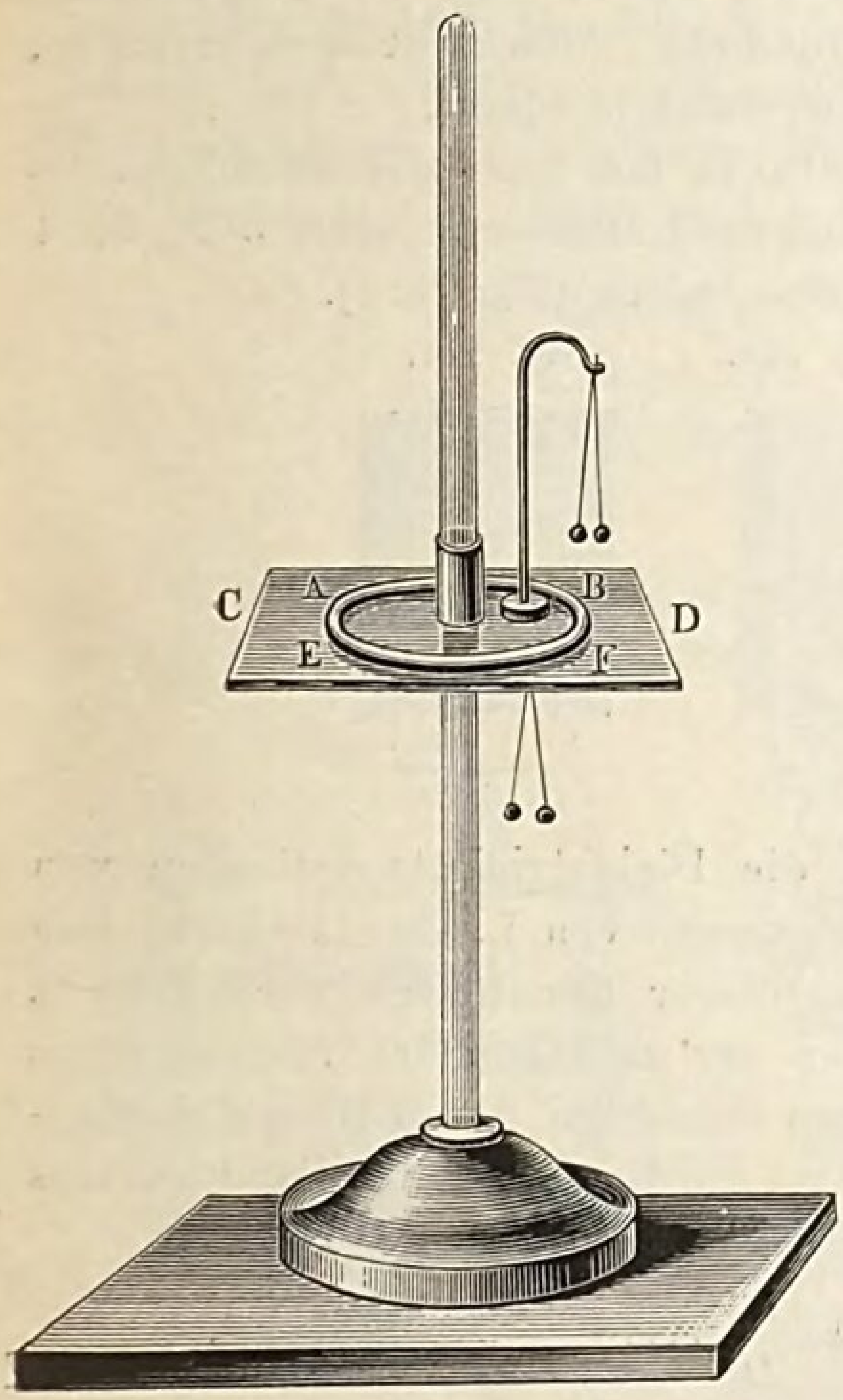
Man kann denselben Versuch auch mit dem schon früher besprochenen Apparat, Fig. 207, anstellen. Nachdem man denselben geladen hat, hebe man die obere Platte ab und entlade sie; alsdann hebe man die Glasplatte auf und entlade auch die untere Metallplatte. Setzt man nun nach Entladung der beiden Metallplatten den Apparat wieder zusammen, wie ihn die Fig. 207 darstellt, so zeigt er sich nach einiger Zeit abermals geladen.

Sehr merkwürdig ist die Beobachtung von Hopkinson, dass das Entstehen und das Verschwinden des Residuums durch Erschütterungen der Flasche beschleunigt wird. Es deutet dies darauf hin, dass bei der Polarisirung des Dielektricums ähnlich wie bei der Magnetisirung des Stahls ein gewisser mechanischer Widerstand zu überwinden ist.

Einfluss der Beschaffenheit des Isolators auf die Condensatorladung. Dielektricitätsconstante. 79 Die Erscheinungen des Residuums lenken unsere Aufmerksamkeit auf den Einfluss, welchen die materielle Beschaffenheit der isolirenden Zwischenschicht eines Condensators für dessen Verhalten hat. Wir haben bisher bei der Ableitung der Theorie der Leydener Flasche diese Zwischenschicht mit Luft erfüllt gedacht. Ersetzen wir sie durch Glas, wie bei der wirklichen Leydener Flasche der Fall ist, oder durch ein anderes Dielektricum, so ändert sich die Capacität des Condensators.

Faraday hat zuerst entdeckt, dass die Menge der von einem Ansammlungsapparate aufgenommenen Elektricität nicht allein von der Grösse, Gestalt und dem Abstande der einander gegenüberstehenden Leiter, z. B. der Condensatorplatten, sondern auch von der Beschaffenheit der isolirenden Zwischenschicht abhängt. Er nannte die isolirenden Körper dielektrische und schrieb ihnen ein specifisches Vertheilungsvermögen zu. Gegenwärtig wird die Zahl, welche dieses abweichende Verhalten der verschiedenen Isolatoren ausdrückt, die „Dielektricitätsconstante" genannt.

Fig 207.



Um uns die Bedeutung der Dielektricitätsconstante klar zu machen, denken wir uns einen Condensator, dessen eine Platte A mit einer Elektricitätsquelle von constantem Potential, dessen andere Platte B mit der Erde in leitender Verbindung steht. Befindet sich nun zwischen den Condensatorplatten eine Luftschicht von der Dicke m, so wird die nicht abgeleitete Platte A eine gewisse Menge von Elektricität E aufnehmen. Ersetzt man jetzt diese Luftschicht durch eine andere isolirende (dielektrische) Substanz, so nimmt die Platte A eine grössere Elektricitätsmenge E' auf. Es ist dann die Dielektricitätsconstante dieser Substanz:

$$D = \frac{E'}{E},$$

also gleich dem Verhältnisse der beiden Ladungen der Platte A, wenn einmal der Zwischenraum durch die Substanz, das andere Mal durch Luft ausgefüllt ist.

Figur 208 stelle uns die beiden Condensatorplatten A und B vor, von denen die eine mit einer Elektricitätsquelle constanten Potentials, die andere mit der Erde verbunden sei. Zwischen den Platten sei eine Luftschicht von 3 mm Dicke vorhanden.

Wir denken uns jetzt eine 1 mm dicke Platte aus Hartgummi zwischen die Platten gesetzt. Sofort steigt die Capacität des Condensators, das Potential der mit der Elektricitätsquelle verbundenen Platte nimmt ab und es muss eine neue Menge Elektricität von jener auf diese übergehen, um das ursprüngliche Potential wieder herzustellen. Um diese ursprüngliche Capacität wieder zu erhalten, müssten wir die Hartgummiplatte 3,15 mal so dick nehmen als die Luftschicht, an deren Stelle sie getreten ist (Fig. 209). Hätten wir statt dessen eine Schwefelplatte eingeschaltet, so müsste dieselbe, wie in Fig. 210 angedeutet, eine 3,84 fache Dicke haben, um die 1 mm dicke Luftschicht so zu ersetzen, dass die Capacität des Condensators unverändert bleibt.

Wollen wir den ganzen Zwischenraum mit Schwefel ausfüllen, so müssten wir an Stelle der 3 mm dicken Luftschicht eine $3 \times 3{,}84 = 11{,}52$ mm dicke Schicht derselben einschalten (Fig. 211).

Fig. 208.

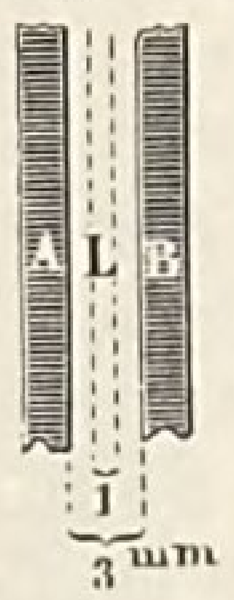


Fig. 209.

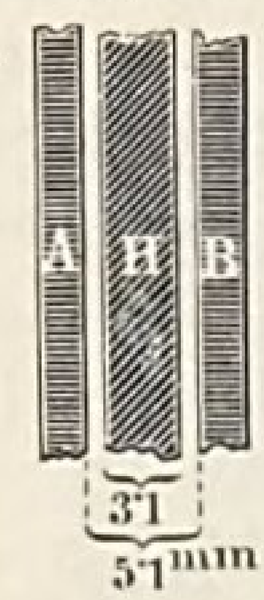


Fig. 210.

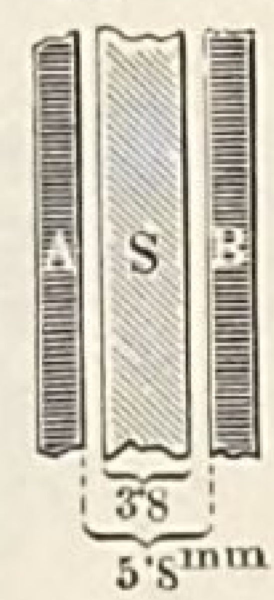
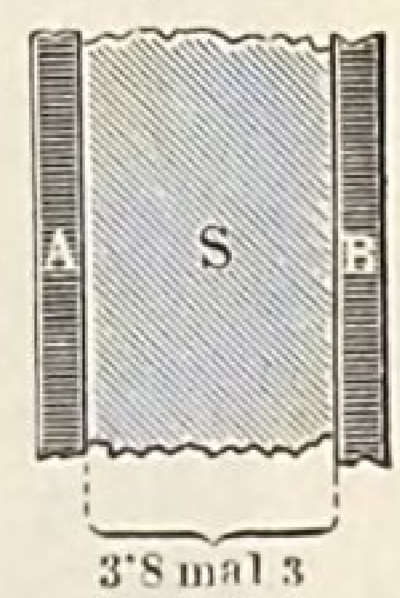


Fig. 211.



Die Zahlen 3,15 und 3,84 sind die Dielektricitätsconstanten von Hartgummi und Schwefel nach den Messungen von L. Boltzmann, dem wir eine bahnbrechende Untersuchung dieser Constanten verdanken*).

Bezeichnen $s_1, s_2, s_3 \ldots$ die Dicken der zwischen den Platten eines Condensators vorhandenen dielektrischen Schichten, deren Dielektricitätsconstanten $= D_1, D_2, D_3 \ldots$ sind, so ist die Capacität des Condensators unter sonst gleichen Umständen verkehrt proportional der Summe

$$\frac{s_1}{D_1} + \frac{s_2}{D_2} + \frac{s_3}{D_3} \cdots$$

Dabei wird die Dielektricitätsconstante der Luft $= 1$ gesetzt.

Bringt man also zwischen die Condensatorplatten vom Abstande S eine Platte eines Körpers, dessen Dielektricitätsconstante $= D$, dessen Dicke $= s$, so ist die Capacität des Condensators verkehrt proportional der Grösse $S - s + \frac{s}{D}$.

*) Wien. Akad. Ber. LXVII. Andere Bestimmungen nach derselben und nach anderen Methoden sind von Gordon, Wüllner, Schiller, Romich, Silow, E. Kohn, G. Quincke ausgeführt worden.

L. Boltzmann hat mit Hülfe eines Thomson'schen Elektrometers die Ladungen gemessen, welche die eine Condensatorplatte aufnahm, wenn nur Luft oder ausser dieser eine den Zwischenraum nicht ganz ausfüllende dielektrische Substanz zwischen den Platten sich befand. Für Glas wurde von Gordon die Dielektricitätsconstante zwischen 3,013 und 3,243 bestimmt. Man hat daraus zu schliessen, dass die Capacität der Leydener Flasche ungefähr dreimal so gross ist, als aus ihren Dimensionen berechnet wird unter Annahme, dass Luft die Zwischenschicht bilde.

Eine bemerkenswerthe Erscheinung, welche mit der des Residuums der Flasche zusammenhängt, ist der Einfluss der Zeitdauer der Influenzwirkung auf die Dielektricitätsconstante, welche desto grösser wird, je länger die Influenz dauert. So steigt z. B. nach Boltzmann die Constante für Colophonium von 2,48 bis 5,61, wenn die Influenzdauer von einem kleinen Bruchtheil einer Secunde bis 90 Secunden verlängert wird. Auch tropfbare und gasförmige Körper sind untersucht worden. So fand Silow für Terpentin die Constante 2,221, für Petroleum 2,054.

Boltzmann erhielt für

Vacuum	0,999410	(Luft = 1 gesetzt)
Wasserstoff . . .	0,999674	
Kohlensäure . . .	1,000356	

u. s. w.*).

Wir können hier leider nicht die ziemlich schwierigen und complicirten, wenn auch sinnreichen Methoden näher besprechen, welche zur genauen Messung der Dielektricitätsconstanten angewendet wurden und wollen statt dessen einen einfachen Vorlesungsversuch beschreiben, welcher nach dem Principe der Lane'schen Maassflasche ausgeführt werden kann**).

Fig. 212.

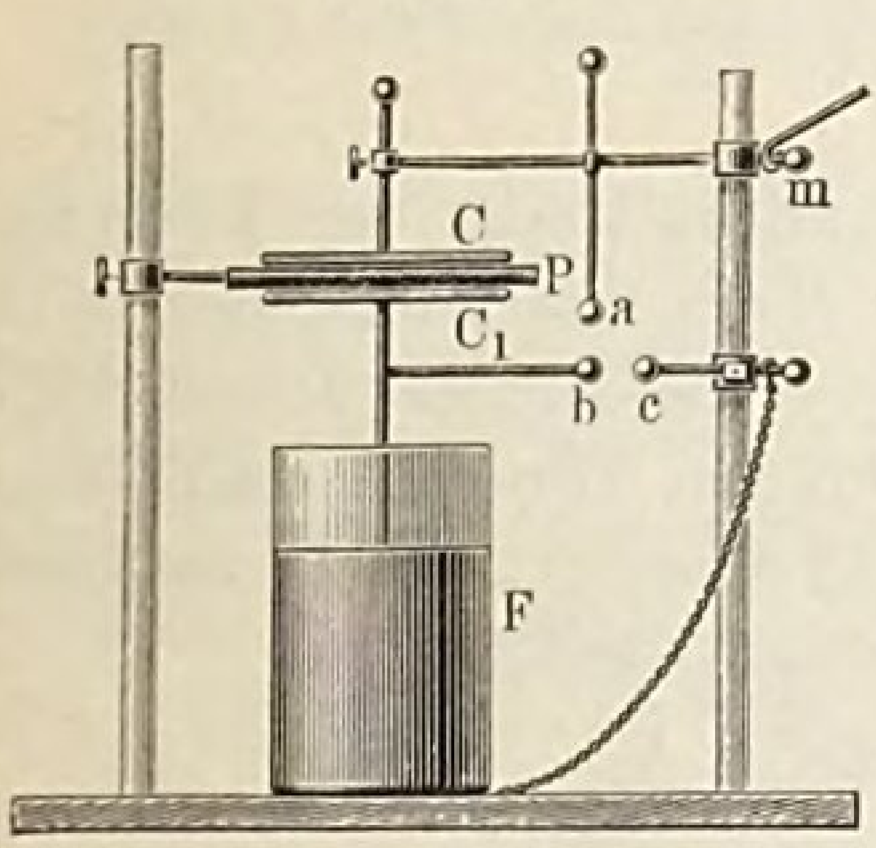


Fig. 212. *F* ist eine Leydener Flasche mit aufgesetzter Condensatorplatte *C'*, die Collectorplatte *C* wird von einem Arme gehalten, der an einer isolirenden Glassäule befestigt ist. An derselben Glassäule kann eine Stange mit einer Kugel *c*, welche mit dem äusseren Belege der Flasche *F* leitend verbunden ist, zum Zwecke der Selbstentladung der letzteren, gegenüber der Kugel *b* aufgestellt werden. Die am oberen Arm verstellbare Kugel *a* mit der Kugel *b* dient zur Selbstentladung des Condensators *CC'*, die Kugel *m* wird mit dem Conductor der Elektrisirmaschine verbunden.

*) Auch von Ayrton u. Perry wurden ähnliche, wenn auch nicht übereinstimmende Werthe erhalten.

**) E. Mach, Ueber die Grundbegriffe der Elektrostatik, Zeitschr. d. elektrot. Vereins in Wien, 1883.

Es ist dies dieselbe Anordnung, wie in Fig. 200, nur mit dem Unterschiede, dass hier der Condensator die Lane'sche Flasche vertritt.

Zählt man nun die Anzahl der Selbstentladungen des Condensators, welche auf eine Entladung der Flasche F kommen, und zwar einmal, wenn sich zwischen den Platten C und C' nur Luft befindet, dann, wenn eine Platte P aus Schwefel oder Hartgummi eingeschaltet ist, so erhält man im ersten Falle stets eine grössere Zahl. Dies beweist, dass die Capacität des Condensators grösser wird, wenn man die Luft durch eines der erwähnten Dielektrica ersetzt. Das Verhältniss der Entladungsanzahl in beiden Fällen giebt wenigstens angenähert die Dielektricitätsconstante.

Im Besitze der Kenntniss der Dielektricitätsconstante des Glases sind wir nun in der Lage, die wirkliche Capacität einer aus Glas hergestellten Leydener Flasche aus ihren Dimensionen zu berechnen.

Im §. 74 haben wir unter Annahme, dass die Flasche Kugelform habe, dass die Radien des inneren und äusseren Belegs $= r$ und r' seien und dass die Isolirschicht aus Luft bestehe, für die Capacität den Ausdruck:

$$C = \frac{r\,r'}{r' - r}$$

erhalten, welcher durch Einführung der Belegoberfläche S und der Dicke der Isolirschicht d überging in den Ausdruck 9):

$$C = \frac{S}{4\,\pi\,d}.$$

Ist nun die Luftschicht durch ein Dielektricum mit der Constanten k ersetzt, so wird:

$$C = \frac{k\,S}{4\,\pi\,d}.$$

Diese Formel kann nun auf die gewöhnliche Form der Leydener Flaschen Anwendung finden, wenn man für S die Oberfläche der Belegung (einer Seite) in Quadratcentimetern, sowie die mittlere Glasdicke d in Centimetern, für k den Mittelwerth 3,2 einsetzt. So z. B. erhält man die Capacität einer Flasche vom Umfange $= 31,4$ cm, welche 20 cm hoch mit Stanniol belegt und 0,3 cm dick im Glase ist, wie folgt:

Mantelfläche		$= 31,4 \times 20 = 628,$
Bodenfläche		$= \frac{100 \times 3,14}{4} = 78,5,$
Gesammtfläche	S	$= 706,5,$
Capacität		$= 600$ cm.

Eine frei stehende Kugel müsste also einen Durchmesser von 12 m haben, um dieser Flasche an Capacität gleich zu kommen.

80 **Verschiedenartige Zusammenstellung von Leydener Flaschen, Franklin's Cascadenbatterie.** Im §. 72 haben wir

bereits erwähnt, dass man mehrere Leydener Flaschen mit einander in der Weise combiniren könne, dass man die sämmtlichen inneren Belege unter sich und ebenso die sämmtlichen äusseren Belege unter sich leitend in Verbindung setzt. Der Erfolg ist dann derselbe, als wenn man eine einzige grössere Leydener Flasche anwenden würde, deren Belegoberfläche gleich der Summe der Belegoberflächen der Einzelflaschen ist. Ist daher die Capacität der einzelnen unter sich gleichen Flaschen $= C$, so hat eine derartige Batterie von n Flaschen die Capacität $n\,C$. Es braucht daher auch die nfache Menge von Elektricität, um sie auf das gleiche Potential zu laden. Die Entladungsenergie ist bei gleichem Potential nmal so gross, wie bei der einzelnen Flasche.

Es giebt aber noch eine andere, nach Franklin benannte Art, eine Anzahl von Flaschen zu einer Batterie zusammenzustellen. Die Figuren 213 und 214 zeigen dieselbe in zwei Formen, von welchen die zweite die gebräuchlichere ist. Die sämmtlichen Flaschen stehen vollständig isolirt auf Glas- oder Hartgummifüssen; bei der Anordnung der Fig. 214 werden das innere Beleg der ersten und das äussere Beleg der letzten Flasche mit den beiden Conductoren der Elektrisirmaschine, oder auch

Fig. 213.

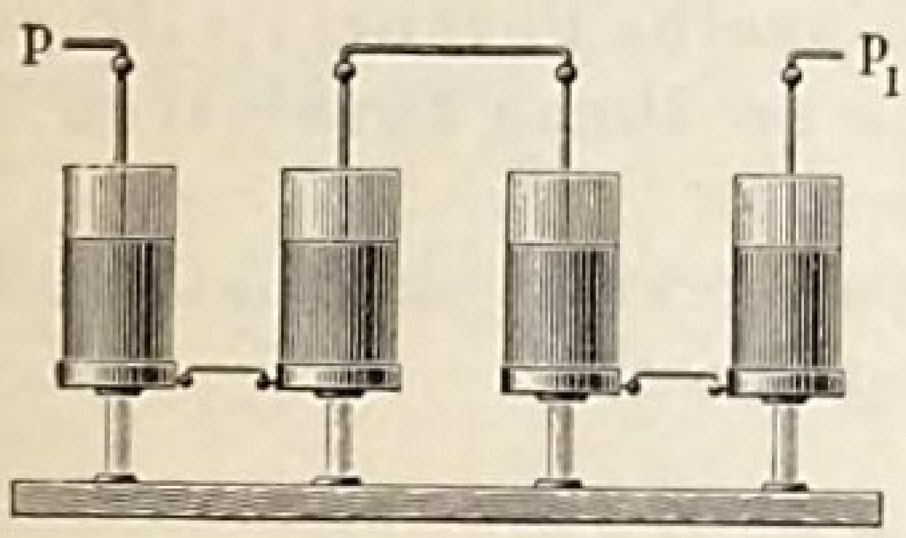
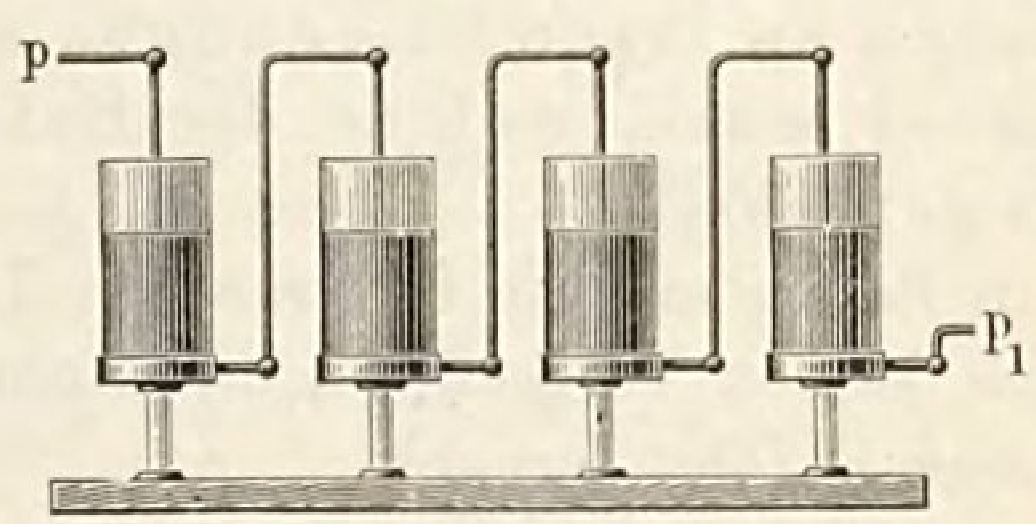


Fig. 214.



mit einem Conductor einerseits, mit der Erde andererseits leitend verbunden. Ausserdem steht das äussere Beleg jeder Flasche mit dem inneren der nächstfolgenden in Verbindung.

Wird dem Ende bei p positive Elektricität zugeführt, so wird am äusseren Belege eine (nahezu) gleiche Menge negativer Elektricität gebunden, ebenso viel positiver Elektricität abgestossen, welche das innere Beleg der zweiten Flasche ladet. So kommt es dazu, dass alle Flaschen innen positive, aussen negative Ladungen erhalten. Bei der Anordnung nach Fig. 213 spielen an den geradzahligen Flaschen die Belege die umgekehrte Rolle.

Die Theorie der Cascadenbatterie ist eine einfache, wenn man sich die Annahme erlaubt, dass die innere und äussere Ladung jeder Flasche gleich gross sei, was nicht genau der Fall ist, da die äusseren Belege die inneren nicht ganz umschliessen. Auch wirken in Folge dieses Umstandes die Flaschen gegenseitig auf einander ein. Sehen wir von diesen Störungen ab, so können wir auf folgende Weise die Wirkung der Batterie berechnen. Es seien n Flaschen von gleicher Capacität C verbunden. Die Potentiale der inneren Belege der Flaschen bezeichnen wir

mit V_1, V_2, V_3 ... V_n. Da die äusseren Belege mit den inneren Belegen der nächsten Flasche verbunden sind, so haben die äusseren Belege der Flaschen die Potentiale V_2, V_3, V_4, ... V_{n+1}, indem wir consequenter Weise das Potential des letzten äusseren Belegs mit V_{n+1} bezeichnen.

Die Elektricitätsmengen resp. Ladungen E der Flaschen sind demnach der Reihe nach gegeben durch die Gleichungen:

$$E_1 = C\,(V_1 - V_2)$$
$$E_2 = C\,(V_2 - V_3)$$
$$E_3 = C\,(V_3 - V_4)$$
$$\vdots$$
$$E_n = C\,(V_n - V_{n+1}).$$

Da aber, wie oben erwähnt, die Ladungen E einander gleich gesetzt werden dürfen, so folgt durch Summirung:

$$nE = C\,(V_1 - V_{n+1}) \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

Aus 1) folgt:

Die Gesammtladung $n\,E$ einer Cascadenbatterie von n Flaschen ist ebenso gross, wie wenn eine einzige dieser Flaschen an ihren Belegungen auf dieselbe Potentialdifferenz gebracht wäre, welche die Batterie an ihren äussersten Belegungen besitzt.

In Bezug auf die Grösse der Ladung gewährt also die Cascadenbatterie keinen Vortheil vor einer einzelnen Flasche.

Aus 1) folgt ferner:

$$V_1 - V_{n+1} = \frac{n\,E}{C}.$$

Bleibt nun $V_1 - V_{n+1}$ constant, wie es z. B. bei Anwendung ein und derselben Maschine annähernd der Fall ist, so bleibt auch die Grösse $\frac{n\,E}{C}$ constant. Verwenden wir also ein andermal n' Flaschen von derselben Capacität C, so gilt, wenn die Flaschenladung diesmal mit E' bezeichnet wird:

$$\frac{n\,E}{C} = \frac{n'\,E'}{C},$$

also:

$$E : E' = n' : n \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

Mit Worten:

Wenn man bei gleichem Potentialunterschiede an den äussersten Belegen die Anzahl n der Flaschen einer Cascadenbatterie ändert, so verhalten sich die von je einer Flasche aufgenommenen Ladungen verkehrt wie die Anzahl der Flaschen.

Die Gesammtladung bleibt also immer gleich gross, so lange die Potentialdifferenz gleich bleibt, weil die einzelnen Flaschen um so weniger Elektricität aufnehmen, je mehr derselben sind.

Man kann sich sehr leicht mittelst der Lane'schen Maassflasche hiervon überzeugen, indem man die Selbstentladungsschlagweite der Batterie constant hält, aber die Flaschenzahl verändert. Es entfallen dann immer eine nahe gleiche Anzahl Entladungen der Maassflasche auf eine Entladung der Batterie.

Berücksichtigt man, dass die Maschine nur die Ladung einer einzigen Flasche zu liefern hat, da die übrigen durch Influenz sich laden, so folgt aus Obigem auch der folgende Satz:

Um eine Cascadenbatterie bis zu einer bestimmten Potentialdifferenz (Schlagweite) zu laden, ist eine Elektricitätsmenge erforderlich, welche sich verkehrt verhält wie die Anzahl der Flaschen.

Um auch noch die Potentialdifferenzen an den Belegen der einzelnen Flaschen zu berechnen, denken wir uns zunächst die beschränkte Zahl $n = 4$ derselben verbunden.

Aus

$$E = C\,(V_4 - V_5)$$

folgt:

$$V_4 = \frac{E}{C} + V_5,$$

ebenso findet man:

$$V_3 = \frac{E}{C} + V_4 = \frac{2\,E}{C} + V_5$$

$$V_2 = \frac{E}{C} + V_3 = \frac{3\,E}{C} + V_5$$

$$V_1 = \frac{E}{C} + V_2 = \frac{4\,E}{C} + V_5.$$

Hieraus ist leicht das Gesetz für eine Batterie von n Flaschen zu deduciren.

Man erhält:

$$V_1 = \frac{n\,E}{C} + V_{n+1}$$

$$V_2 = \frac{(n-1)\,E}{C} + V_{n+1}$$

$$V_3 = \frac{(n-2)\,E}{C} + V_{n+1}$$

$$\vdots \qquad \vdots \qquad \vdots$$

$$V_n = \frac{E}{C} + V_{n+1}.$$

Die Potentiale der inneren Belege der Flaschen einer Cascadenbatterie nehmen also nach einer arithmetischen Reihe ab, deren constante Differenz $= \frac{E}{C}$ ist. Die Potential-

differenz zwischen den äussersten Belegen ist also in ebenso viele gleiche Stufen getheilt als Flaschen sind, auf jede Flasche trifft es demnach den nten Theil der gesammten Potentialdifferenz der ganzen Batterie. Daher erklärt sich auch die Bezeichnung Cascadenbatterie, da ähnlich wie bei einer Cascade das Wassergefälle in eine Anzahl kleinerer Stufen getheilt ist, auch hier das elektrische Gefälle in Stufen getheilt erscheint.

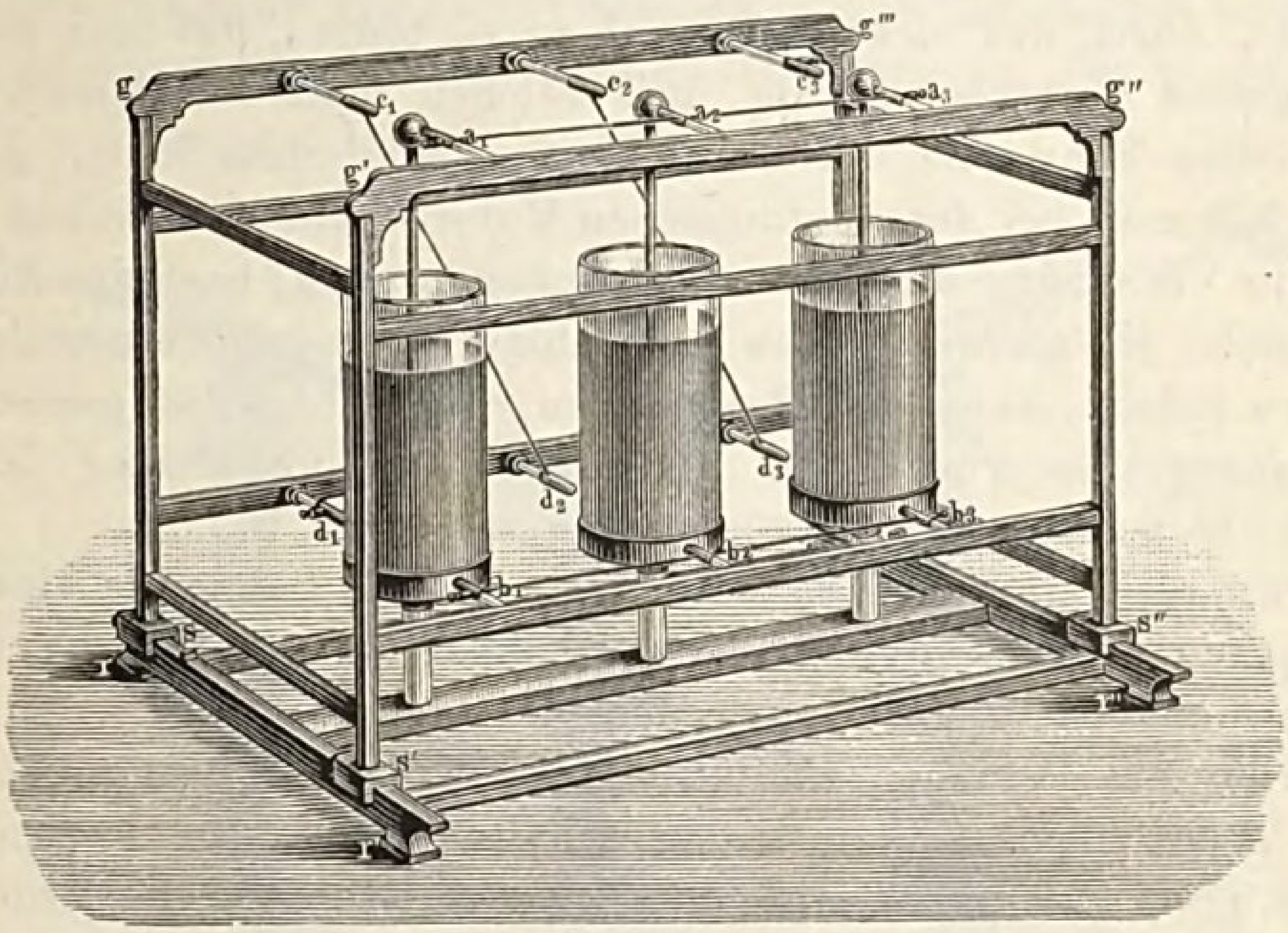
Worin besteht also der Vortheil, den die Cascadenbatterie für gewisse Experimente darbietet? In Folge Vertheilung der Potentialdifferenz auf mehrere Flaschen ist die Gefahr der Selbstentladung längs des Glases oder durch dasselbe geringer, man kann daher viel grössere Potentialdifferenzen anwenden, als bei einzelnen Flaschen oder bei der gewöhnlichen Batterie. Ferner gestattet die Cascadenbatterie von n Flaschen, dass man mit der relativ geringen Elektricitätsmenge E, welche eine der Flaschen nur auf eine Potentialdifferenz $= \frac{E}{C}$ laden würde, an den äussersten Belegen eine Potentialdifferenz $= n \frac{E}{C}$ hervorbringt. Man erhält daher an der Cascadenbatterie nach verhältnissmässig kurzer Drehung der Maschine eine ebenso grosse Schlagweite als die Maschine für sich giebt. Am vortheilhaftesten ist es, zuerst die isolirten Flaschen zu einer gewöhnlichen Batterie (auf Quantität) zu verbinden und zu laden, dann zur Cascadenbatterie (auf Spannung) umzuschalten.

Ist die Potentialdifferenz, welche die Maschine zu liefern vermag, $= V$, so erhält jede Flasche der gewöhnlichen Batterie für sich eine Ladung $= C V$ und die ganze Batterie $= n C V$. Zur Cascadenbatterie umgestaltet, nimmt dieselbe dann an den äussersten Enden die nfache Potentialdifferenz $n V$ an, welcher ungefähr die nfache Schlagweite entspricht.

Die Cascadenbatterie bietet also dort Vortheile, wo es mehr auf lange Funken als auf grosse Mengen entladener Elektricität ankommt. Um die erwähnte Umschaltung ohne Mühe und rasch genug vornehmen zu können, hat E. Mach die in Fig. 215 abgebildete Umschaltungsvorrichtung construirt, welche sich selbstverständlich auch für eine grössere Flaschenzahl einrichten lässt. Die Flaschen ruhen auf Glasfüssen, welche auf der mittleren Längsleiste des Holzrahmens $r r' r''$ befestigt sind. Auf den horizontalen Seitenleisten dieses Rahmens ruht auf Schlitten $s s' s''$ mit Rollen von vorn nach rückwärts verschiebbar das Gestell $g g' g''$ aus Holz, welches die Contactvorrichtungen trägt. Letztere (in Fig. 216 in grösserem Maassstabe abgebildet) bestehen aus einer isolirenden Glasstange G mit angekitteter Messinghülse H, in welcher das Contactstück C mittelst einer Spiralfeder verschiebbar eingesetzt ist. Die Contactvorrichtungen a_1, a_3, b_1, b_3, d_1 und c_3 sind ausserdem noch mit Klemmen K versehen.

Die Fig. 215 zeigt die Verbindung der Flaschen zur gewöhnlichen Batterie. Dabei ist das Gestell $g\,g'\,g''$ nach rückwärts geschoben, bis die unter sich leitend verbundenen Contactstücke a_1, a_2, a_3 an die Kugeln der Flaschen und ebenso die unter sich verbundenen Contactstücke b_1, b_2, b_3 an die Fassungen der äusseren Belege anzuliegen kommen. Um die Cascadenverbindung herzustellen, zieht man das Gestell nach vorn. Die frühere Verbindung wird dadurch aufgehoben und dafür treten die Contacte c_1, c_2, c_3 und d_1, d_2, d_3 in Wirksamkeit. c_1 und d_2, sowie c_2 und d_3 sind unter sich leitend verbunden, d_1 und c_3 bilden die Pole der Batterie.

Fig. 215.



E. Mach verband mittelst einer solchen Umschaltung 16 Flaschen von 4 qm innerer Belegfläche (Gesammtcapacität ungefähr = 50000 cm) zu einer Cascade von acht Flaschenpaaren und erhielt damit imposante Effecte. Die Schlagweite stieg bei kleinen Ladungen auf das 33 fache, bei grösseren Ladungen weniger hoch. Ohne Schwierigkeit wurden gesättigte Funken von 16 cm Schlagweite erhalten, dieselben sind blitzartig, während die der gewöhnlichen Batterie mehr klumpenförmig erscheinen. Vergrössert man den Widerstand durch eingeschaltete, mit Wasser gefüllte Capillarröhren, so nehmen die Funken das Ansehen jener eines Ruhmkorff'schen Apparates an. Man kann durch grössere Widerstände die Entladungsdauer auf 1 bis 2 Secunden verlängern, wobei der Funken dem Davy'schen Lichtbogen ähnlich wird [1]).

Fig. 216.



*) Anzeiger der Wien. Akademie, 1876, Bd. XV.

81 **Physiologische Wirkungen des Entladungsschlages.** Wenn der Entladungsschlag einer Leydener Flasche durch den menschlichen Körper hindurchgeht, so bringt er eine eigenthümliche, schwer zu beschreibende Empfindung, ein schmerzliches Gefühl in den Gelenken und ein unwillkürliches Zucken der Muskeln hervor. Man macht den Versuch, indem man mit der einen Hand die äussere Belegung, mit der anderen den Knopf anfasst. Bei schwächeren Ladungen ist der Schlag nur in den Vorderarmen fühlbar; bei stärkeren fühlt man ihn auch im Oberarm, und wenn die Ladung noch stärker gemacht wird, so bringt der Schlag einen heftigen Schmerz in der Brust hervor. Sehr starke Schläge können in der That gefährlich werden. Um kleinere Thiere wie Vögel, Hasen etc., durch den elektrischen Schlag zu tödten, hat man noch nicht einmal grosse Batterien nöthig, mit welchen man selbst noch grössere Thiere tödten kann. An den durch einen elektrischen Schlag getödteten Thieren hat man bei der anatomischen Untersuchung derselben bis jetzt noch keine Verletzung der Organe entdecken können; nach den Zuckungen aber, welche sie machen, wenn der Schlag nicht ganz hinreichend war, um sie zu tödten, kann man beurtheilen, wie heftig das ganze Nervensystem angegriffen worden ist. Geht der Entladungsschlag durch Blut hindurch, so werden die Blutkörperchen zerstört.

Wenn mehrere Personen eine Kette bilden, indem sie einander die Hände geben, und die erste die äussere Belegung der Flasche, die letzte den Knopf anfasst, so fühlen alle den Schlag auf einmal.

Wären die Personen sämmtlich vom Erdboden isolirt, so würden sie alle einen gleichstarken Schlag erhalten; wenn die Isolirung fehlt, geht ein Theil der Elektricität durch Nebenleitung in die Erde, und es erhalten dann die gegen die Enden der Kette befindlichen Personen einen stärkeren Schlag, als die in der Mitte derselben.

Eine beachtenswerthe Entdeckung ist die, dass vom Blitze getroffene Menschen manchmal nur daran zu Grunde gehen, dass die den Athmungsprocess beherrschenden Nervenpartien zeitweilig gelähmt werden. Durch rechtzeitig eingeleitete künstliche Athmung könnten solche Individuen unter günstigen Umständen vom Tode errettet werden.

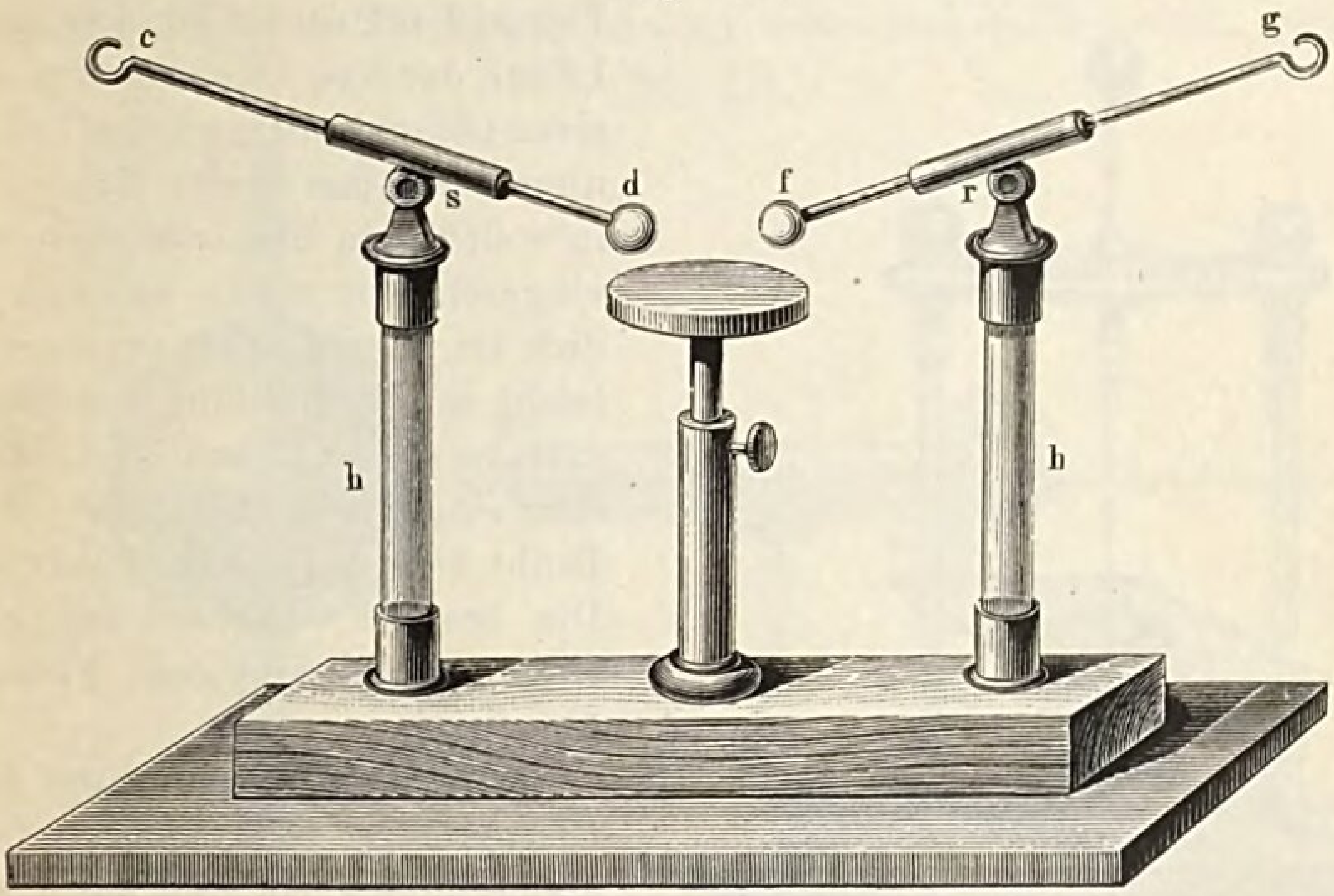
82 **Mechanische Wirkungen der elektrischen Entladung.** Zu sehr vielen Versuchen, die man mit dem Entladungsschlag der Leydener Flasche und der elektrischen Batterie anstellen kann, ist der Henley'sche allgemeine Auslader, welcher in Fig. 217 dargestellt ist, ganz besonders bequem. Der eine Arm *cd* wird durch eine Kette mit der äusseren Belegung in leitende Verbindung gebracht, an dem anderen Arme *gf* ist aber eine Kette befestigt, welche an die eine Kugel eines der im §. 72 beschriebenen Ausladers angehängt wird. Wenn man den Funken durchschlagen lassen will, so nähert man die andere Kugel des Ausladers rasch dem Knopfe der Flasche.

Schlechte Leiter, welche den Weg des Entladungsschlages unter-

brechen, werden, wenn die Anhäufung der Elektricität bedeutend genug ist, zertrümmert oder durchlöchert. Eine Holzscheibe z. B., welche 6 bis 10 cm Durchmesser hat und 5 bis 10 mm dick ist, wird von dem Entladungsschlage durchbohrt. Ebenso ein oder mehrere Kartenblätter, Pappendeckel etc. Um den Versuch zu machen, werden die Kugeln *d* und *f* des Henley'schen Ausladers ab- und statt dessen Metallspitzen angeschraubt. Zwischen diese beiden Spitzen wird nun der zu durchschlagende Körper eingeschoben und die Spitzen dann soweit genähert, dass sie ihn berühren.

Wenn ein Kartenblatt so zwischen die Spitzen des Henley'schen Ausladers gestellt wird, dass die Spitzen nicht genau einander gegenüber, sondern so, dass die Punkte, in welchen sie das Kartenblatt berühren, 2 bis 3 cm auseinander stehen, so wird es stets an der negativen

Fig. 217.



Spitze durchbohrt. Die Ränder der Oeffnung sind nach beiden Seiten in die Höhe gerissen (der Lullin'sche Versuch). Im Vacuum bildet sich nach Tremery die Oeffnung stets in der Mitte zwischen den beiden Spitzen.

Ueber die Erklärung des Lullin'schen Versuchs findet man Näheres in dem später folgenden Paragraphen über die Lichtenberg'schen Figuren.

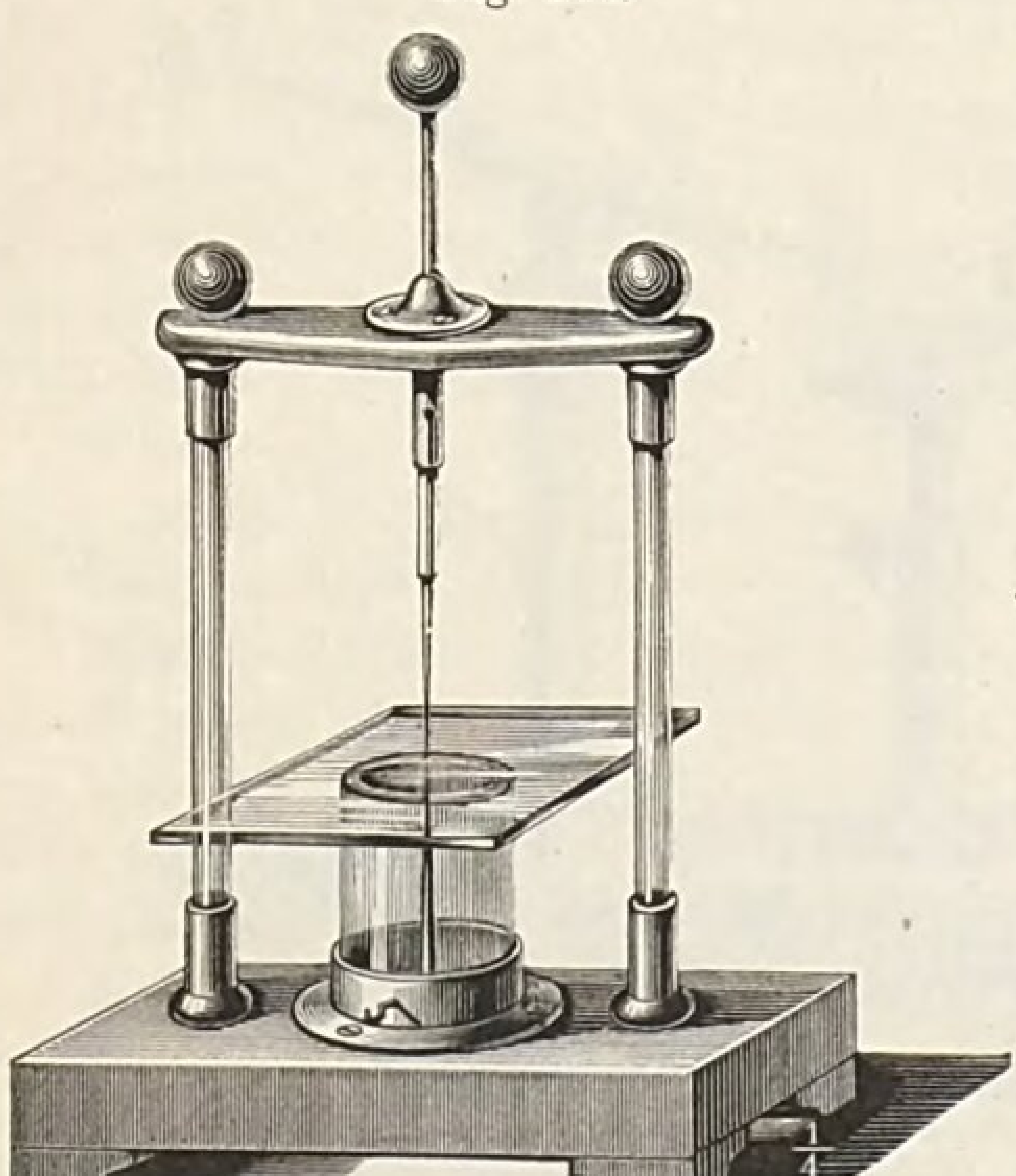
Um eine Glasplatte zu durchschlagen, muss man dafür sorgen, dass die Elektricität möglichst an einem Punkte concentrirt werde; die Glasplatte muss deshalb zwischen zwei einander genau gegenüber stehenden leitenden Spitzen befestigt sein. Man kann zu diesem Zwecke den Apparat Fig. 218 (a. f. S.) anwenden. Die Glasplatte wird, wenn sie in den Apparat eingesetzt ist, mit einer dünnen Oelschicht übergossen, weil sonst der Funken leicht um das Glas herumschlägt.

Beim Durchschlagen des Glases kommt es mehr auf hohe Spannung als auf grosse Menge der Elektricität an, der Versuch gelingt deshalb am besten mit einer Flasche von etwas dickem Glase.

Ja, der einfache Funken des Conductors einer kräftigen Elektrisirmaschine ist, wie Holtz neuerdings gezeigt hat, zum Durchbohren dickerer Glasplatten wirksamer, als der Entladungsschlag der Leydener Flasche.

Um dickere Glasplatten zu durchbohren, ist vor allen Dingen nöthig, die Spitze, von welcher aus die Durchbohrung stattfinden soll, möglichst gut zu isoliren. Man kann zu diesem Zwecke dieselbe Vorrichtung gebrauchen, welche Ruhmkorff anwandte, um dicke Glasplatten durch den Funken seines Inductionsapparates zu durchbohren und welchen wir später noch werden kennen lernen; noch zweckmässiger aber ist die Holtz'sche, durch Fig. 219 erläuterte Vorrichtung. Längs der Axe eines sonst massiven Glascylinders gg läuft eine ungefähr 1 mm weite Höhlung, in welche ein Stahlstäbchen ab eingeschoben wird, welches so dick ist, dass es sich eben noch leicht in der Höhlung des Glascylinders verschieben lässt. Auf der einen Seite bei b ist der Draht zugespitzt und gehärtet. Die äussere Glaswand ist mit einem durchsichtigen Firniss überzogen.

Fig. 218.



An der einen Seite muss der Glascylinder vollkommen eben abgeschliffen sein, und auf diese plangeschliffene Fläche wird dann die zu durchbohrende Glasplatte, nachdem beide Stücke vorher vorsichtig erwärmt worden sind, mittelst einer Masse aufgekittet, welche man durch Zusammenschmelzen von 1 Theil Schellack mit 2 bis 3 Theilen venetianischem Terpentin erhält.

Der Stahldraht wird natürlich so in die Höhlung eingeschoben, dass die Spitze b die zu durchbohrende Platte berührt. Die zweckmässigste Anordnung des Versuchs ist alsdann folgende. Der Glascylinder gg wird in horizontaler Lage von einem isolirenden Stativ getragen und das aus dem Glascylinder gg hervorragende Ende a des Stahldrahtes in eine Höhlung o des Conductors der Elektrisirmaschine so eingeschoben, dass der Draht die Wandung der Höhlung berührt. Sollte in dem Conductor keine solche Höhlung vorhanden sein, so muss bei a eine Metall-

kugel an den Draht angesetzt und diese dann mit dem Conductor in Berührung gebracht werden.

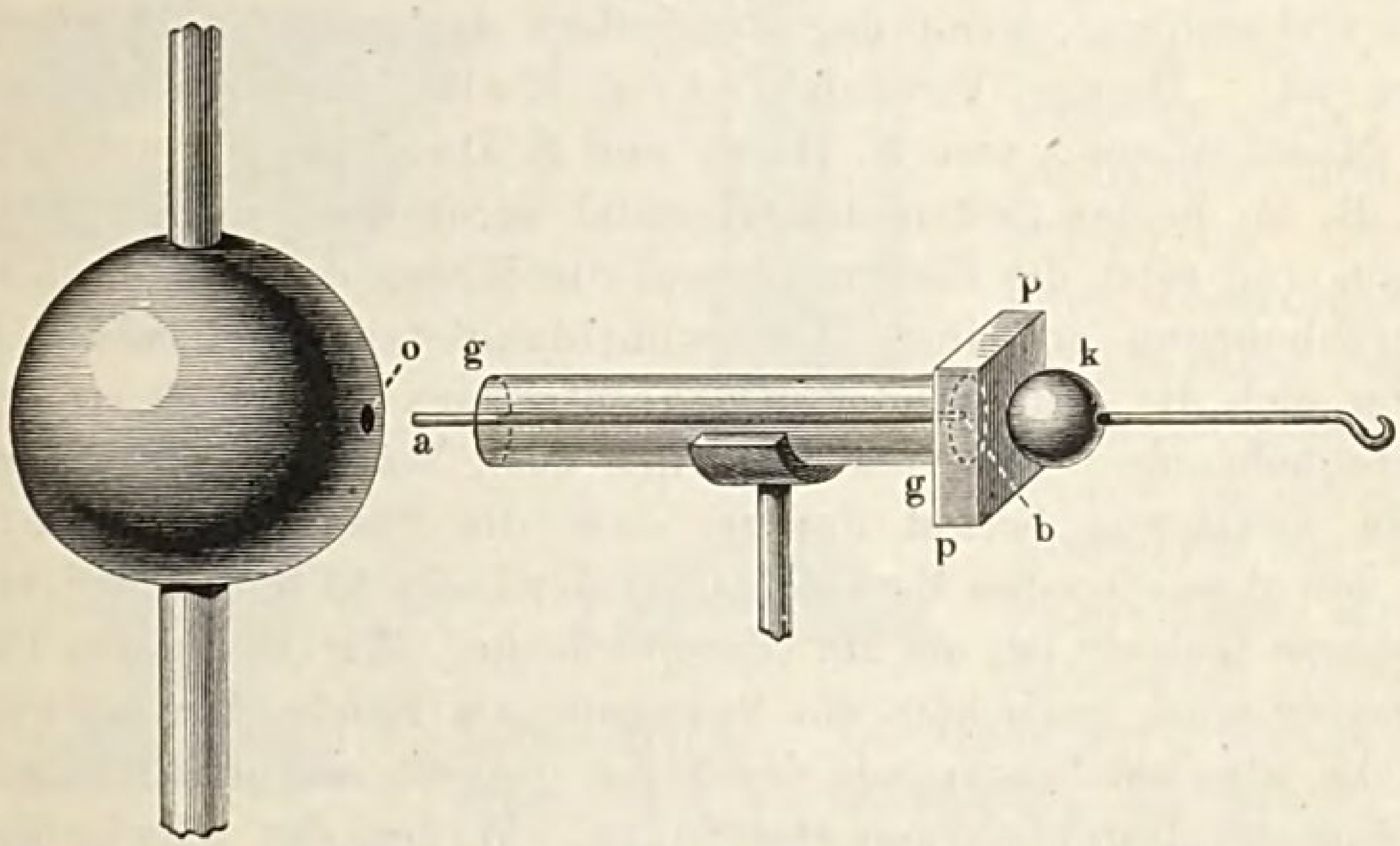
Auf die äussere Fläche der Glasplatte *pp* wird dann, gerade der Spitze *b* gegenüber, eine Messingkugel *k* aufgesetzt, welche mit dem Boden in gut leitender Verbindung steht.

Wenn man mit einer Winter'schen Maschine experimentirt, muss man, um kräftigere Funken zu erhalten, den im §. 59 besprochenen Holzring auf den Conductor aufsetzen, von welchem in Fig. 219 der unterste Theil sichtbar ist.

Nach gehöriger Aufstellung der oben beschriebenen Vorrichtung bedarf es nur weniger Umdrehungen der Scheibe, um einen die Glasplatte durchbohrenden Funken zu erzeugen.

Mit einer Elektrisirmaschine, welche in Luft 8, 16, 32 cm lange Funken giebt, kann man $^1/_2$, $1^1/_2$, 4 cm dicke Glasplatten durchschlagen. Die Wanddicke des Glascylinders *gg* muss jedenfalls grösser sein, als

Fig. 219.



die Dicke der zu durchschlagenden Glasplatte. Der Glascylinder ist ungefähr fünfmal so lang als sein Durchmesser.

Der Weg, welchen der Entladungsfunken durch das Glas nimmt, ist keineswegs geradlinig, sondern eigenthümlich gezackt, wie man dies auch bei längeren elektrischen Funken in der Luft wahrnimmt; auch bildet er nicht einfach eine glattwandige Röhre, sondern ringsum ist das Glas aufgerissen, so dass das durchgeschlagene Loch ungefähr aussieht, wie ein weisser Zwirnsfaden, an den sich ringsum glänzende Krystallflitterchen angesetzt haben.

A. v. Waltenhofen hat gezeigt*), dass bei Glasplatten von 1 bis 2 mm Dicke die Durchbohrung durch Auftropfen von Stearin wesentlich erleichtert werden kann. Dabei zeigen sich noch insbesondere folgende interessante Erscheinungen. Bringt man eine Glasplatte, deren

*) Dingl. polyt. Journ. Bd. 179 und Wien. Akad. Ber. Bd. LXXIX.

eine Seite mit einem aufgetropften Stearinringe von einigen Centimetern Durchmesser versehen ist, zwischen die Spitzen zweier in einer Linie liegenden Elektroden, so erfolgt bei der Entladung einer Leydener Flasche oder des Funkenstromes der Influenzmaschine eine einzige Durchbohrung am inneren Rande des Stearinringes, also nicht zwischen den Spitzen. Stellt man dagegen die Elektrodenspitzen gleich weit vom Centrum entfernt senkrecht auf einen Durchmesser des Stearinringes, so folgt bei genügend starker Entladung in der Regel eine Anzahl von Durchbohrungen und zwar wiederum am Innenrande des Ringes. Es wurden manchmal bis zu 15 Durchbohrungen gezählt.

Bringt man auf die Glasplatte ein kleines Stearintröpfchen und hält dieselbe zwischen die einige Centimeter von einander entfernten kugelförmigen Elektroden der Influenz- oder gewöhnlichen Elektrisirmaschine, so erfolgt, falls der Rand nicht zu nahe ist, eine Durchbohrung an der Stelle des Fleckes. Der Versuch gelingt auch mit dem continuirlichen Funkenstrome der Influenzmaschine. Auffallender Weise gelingt er aber viel sicherer, wenn der Stearinfleck der positiven Elektrode zugekehrt ist. Diesen Versuchen A. v. Waltenhofen's reihen sich einige Modificationen von E. Mach und S. Doubrava*) an. Bringt man z. B. an beiden Seiten der Glastafel excentrisch gelegene Stearinringe an, und setzt die Elektroden auf die Mitten der Ringe, so erfolgt die Durchbohrung an einer Durchschneidungsstelle der beiden Ringe. Berühren sich die Innenränder der excentrischen Kreise, so erfolgt dort die Durchbohrung. Wie Stearin wirken auch Wachs und Paraffin.

Die Erklärung beruht darauf, dass die Stearinoberfläche, wohl wegen der abweichenden Beschaffenheit der Luftschichten auf derselben, ein besserer Isolator ist, als die Glasoberfläche. Wie bei einem Plattencondensator muss auch hier die Spannung am Rande der unbedeckten Glasfläche, also am Innenrande des Stearinringes, am grössten sein und daher dort die Durchbohrung stattfinden. Wegen der schwierigen Erklärung der mehrfachen Durchbohrungen bei excentrischer Stellung sehe man die zuletzt citirte Stelle.

Durch die v. Waltenhofen'sche Entdeckung werden, wenigstens für dünne Glasplatten, die früher beschriebenen complicirten Vorrichtungen entbehrlich gemacht.

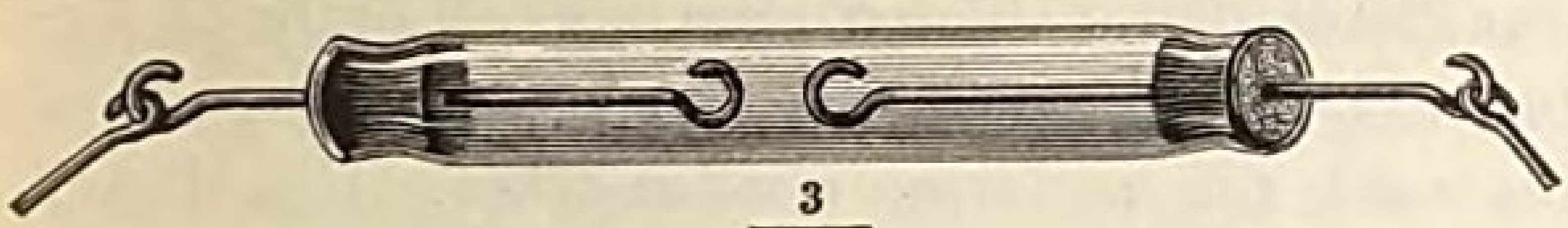
Wenn man die Elektricität in einer Flüssigkeit überschlagen lässt, so erscheint ebenfalls ein Funken; auch das Knacken wird gehört, fast immer aber wird die Flüssigkeit mit grosser Gewalt aus einander geschleudert. Wenn man eine Glasröhre mit Wasser füllt und sie an beiden Enden mit Korkstopfen verschliesst, durch welche die Zuleitungsdrähte hindurchgehen, wie es Fig. 220 erläutert, so wird die Röhre durch den Entladungsschlag in der Regel zertrümmert.

Selbst offene mit Wasser gefüllte Glasgefässe werden oft zersprengt,

*) Wien. Akad. Ber. Bd. LXXVIII.

wenn ein kräftiger Entladungsschlag zwischen zwei Metallkügelchen im Wasser übergeht. Eine dazu taugliche Vorrichtung ist in Fig. 221 dargestellt.

Fig. 220.



$\frac{3}{4}$

Fig. 221.

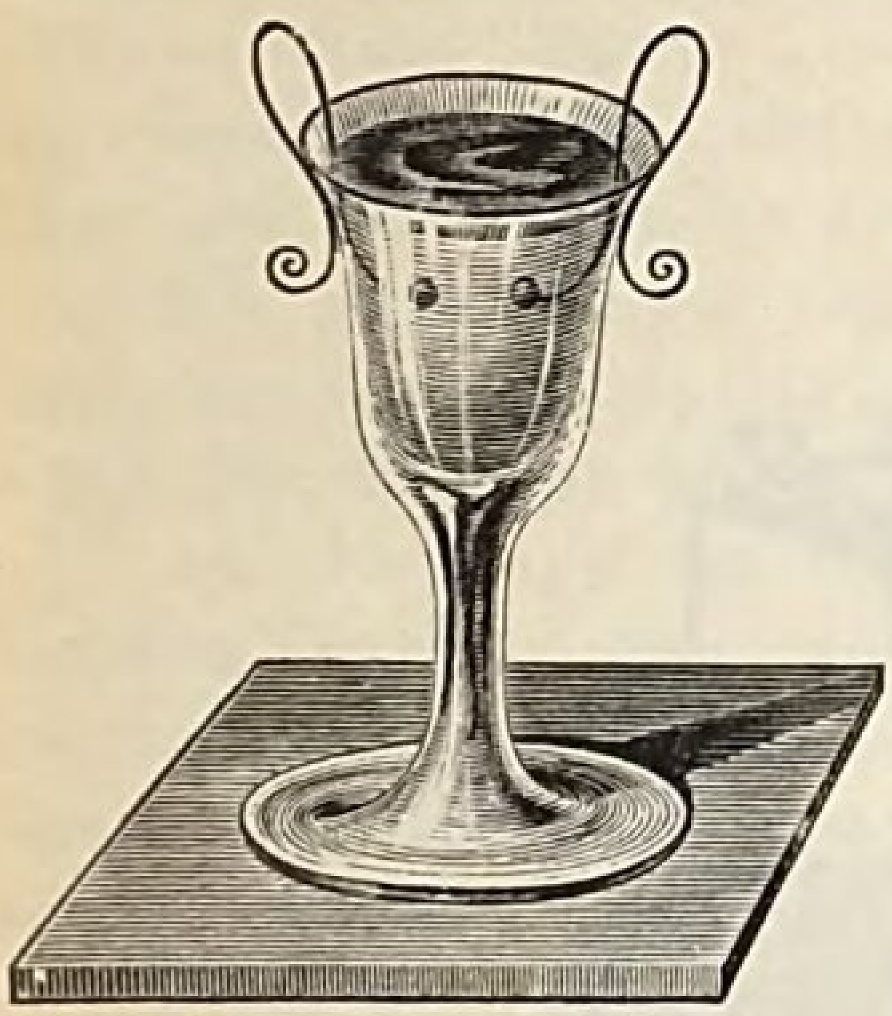


Fig. 223.

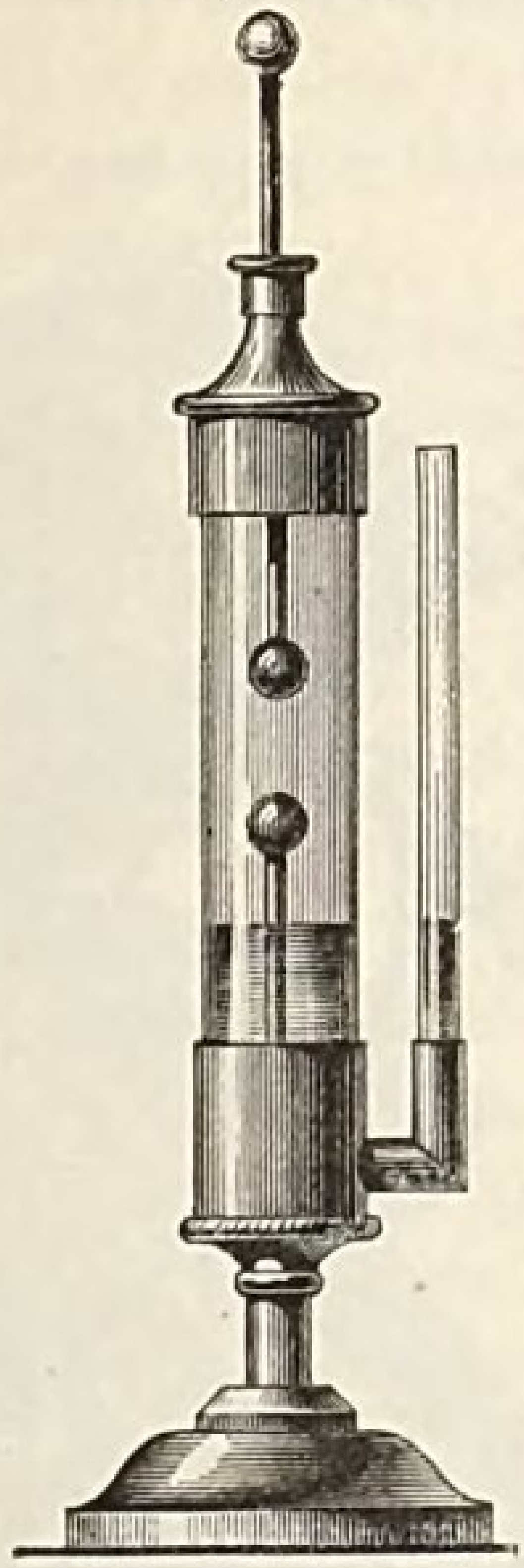
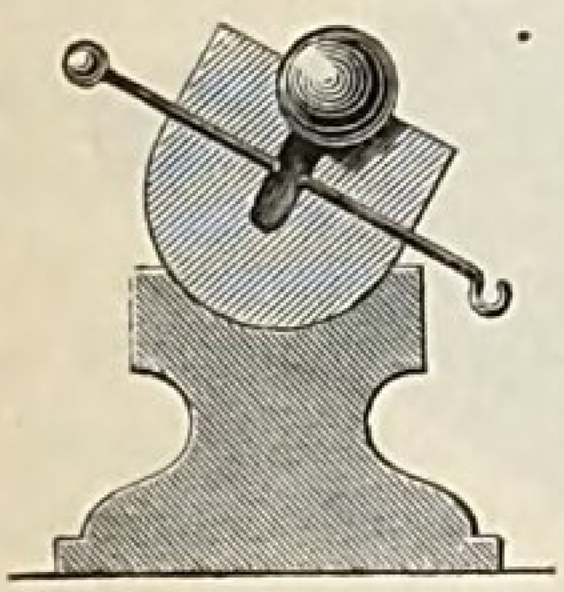


Fig. 222.



In Gasen bringt der Entladungsschlag eine so grosse und plötzliche Expansion hervor, dass sie eine kleine Kugel mit Hülfe des elektrischen Mörsers, Fig. 222, fortschleudern kann. Kinnersley, welcher zuerst diese Erscheinung beobachtete, construirte auch einen Apparat, um ihre Intensität zu bestimmen. Kinnersley's Thermometer ist in Fig. 223 abgebildet und wohl schon aus der Figur ohne weitere Erklärung verständlich; wenn zwischen den beiden Kugeln im Inneren des weiteren Glasrohres ein Funken überschlägt, steigt die Flüssigkeit in der seitlichen Röhre. Die Höhe des Steigens ist ein Maass für die Expansion des Gases. Dieser Versuch gehört, streng genommen, zu den im nächsten Paragraphen besprochenen thermischen Wirkungen.

Thermische Wirkungen der elektrischen Entladung. 83

Wenn man die Kugeln *d* und *f* des Ausladers, Fig. 217, durch einen sehr dünnen Eisendraht verbindet, so wird dieser erwärmt, wenn ein schwacher Schlag hindurchgeht; eine stärkere Ladung macht ihn rothglühend und eine noch stärkere bewirkt, dass er in einzelnen geschmolzenen Kügelchen aus einander fährt, die weithin fortgeschleudert werden.

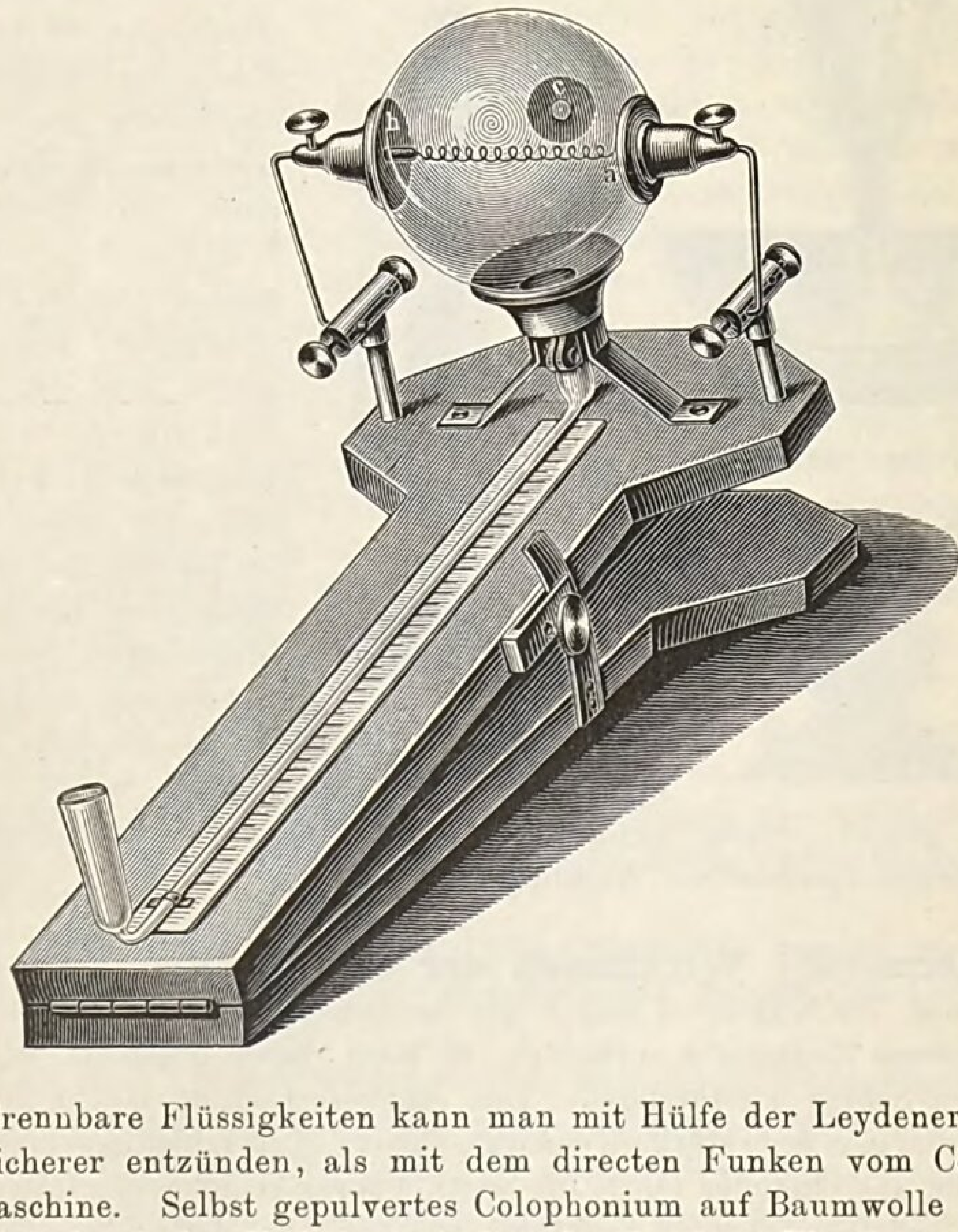
Ein schmaler Streifen Zinnfolie, welcher 5 bis 10 cm lang ist, wird durch den Entladungsschlag einer gewöhnlichen Batterie verflüchtigt, der Dampf oxydirt sich und bildet lange, in der Luft schwebende, Spinnengeweben ähnliche Fäden.

Auch andere Metalle werden auf diese Weise erhitzt, glühend gemacht, geschmolzen und oxydirt; wenn man sie aber von gleicher Länge

und von gleichem Durchmesser nimmt, so bringt dieselbe Ladung nicht denselben Effect hervor. Die schlechteren Leiter, wie Platin und Eisen, werden bei gleichen Dimensionen weit stärker erwärmt, als Gold und Kupfer, welche bessere Leiter sind.

Mit Gold übersponnene Seidenfäden bieten eine eigenthümliche Erscheinung dar. Das Gold, welches sie bedeckt, wird verflüchtigt und oxydirt, ohne dass die Seide auch nur zerrissen worden wäre. Um diesen Versuch recht deutlich zu machen, hält man an den Faden ein Stück weissen Papiers, auf welchem man nach dem Schlage einen breiten Streifen von brauner Farbe sieht.

Fig. 224.



Brennbare Flüssigkeiten kann man mit Hülfe der Leydener Flasche weit sicherer entzünden, als mit dem directen Funken vom Conductor der Maschine. Selbst gepulvertes Colophonium auf Baumwolle gestreut lässt sich durch den Entladungsfunken der Leydener Flasche entzünden.

Ueber die Entzündung des Schiesspulvers werden wir im folgenden Paragraphen Näheres mittheilen.

Um die Gesetze der Erwärmung dünner Drähte durch den Entladungsschlag zu ermitteln, wandte Riess, wie schon früher Harris, ein Luftthermometer an, durch dessen Kugel ein dünner Platindraht hin-

durchging, welcher in den Weg des Entladungsschlages eingeschaltet wurde.

Fig. 224 stellt ein Riess'sches elektrisches Luftthermometer in $^1/_4$ der natürlichen Grösse dar. Die Glaskugel, welche ungefähr 8 cm im Durchmesser hat, ist an drei Stellen durchbohrt. Die Oeffnungen bei *a* und *h* stehen einander diametral gegenüber und sind mit durchbohrten Metallfassungen versehen, zwischen welchen der Platindraht ausgespannt wird; die dritte Oeffnung *c* ist ebenfalls mit einer Metallfassung versehen, deren Bohrung durch einen Messingstöpsel verschlossen ist. Durch Oeffnen dieses Stöpsels unmittelbar vor dem Versuch kann man die Luft im Inneren der Kugel mit der äusseren ins Gleichgewicht setzen, worauf dann der Stöpsel wieder eingesetzt wird.

Der in der Kugel befindliche spiralförmig gewundene Platindraht hatte bei den meisten Riess'schen Versuchen eine Länge von 13 cm und einen Durchmesser von nahe 0,08 mm.

An die Kugel ist eine Glasröhre von ungefähr 1 mm Weite im Lichten angeschmolzen, welche auf einem mit einer Theilung versehenen Brette befestigt ist und mit einem trichterförmigen Gefässe endigt. Man kann die Röhre nach Belieben mehr oder weniger stark gegen die Horizontale neigen.

Giesst man in das trichterförmige Gefässchen eine gefärbte Flüssigkeit, etwa gefärbtes Wasser, so wird es bis zu einer gewissen Stelle in der Röhre aufsteigen. Wenn nun, nachdem alles im Gleichgewicht ist, die Oeffnung bei *c* wieder geschlossen wird, so ist die Luft in der Kugel vollständig abgesperrt. Geht ein Entladungsschlag durch den Platindraht, so wird er erwärmt, er theilt diese Wärme der Luft in der Kugel mit, sie wird ausgedehnt und treibt die Flüssigkeit in der Röhre um so weiter herab, je stärker die Erwärmung war. Diese Depression ist also ein Maass für die Erwärmung, welche durch den Entladungsschlag im Platindrahte bewirkt wird.

Der Apparat ist so eingerichtet, dass man ihn bequem in den Schliessungsbogen der Batterie einschalten kann. In dieser Beziehung bedarf jedoch die Figur keiner weiteren Erläuterung.

Eine Versuchsreihe mit diesem Apparat gab unter anderen die in folgender Tabelle zusammengestellten Resultate:

s	2	4	6
q	*h*	*h*	*h*
2	3,0	—	—
4	13,4	6,4	5,2
6	26,8	14,6	11,0
8	—	28,2	18,6

In der obersten Horizontalreihe steht die Anzahl s der angewandten Flaschen, in der ersten Verticalreihe die angewandten Elektricitätsmengen q, gemessen durch die Zahl der Entladungsfunken der Maassflasche. Die entsprechenden Depressionen h des Thermometers sind in Millimetern ausgedrückt. Als z. B. die Elektricitätsmenge 4 auf 2 Flaschen vertheilt war, erhielt man die Depression 13,4 mm. Dieselbe Elektricitätsmenge auf 4 und 6 Flaschen vertheilt, gab nur die Depression 6,4 und 5,2. Bei gleicher Ladung verhält sich also die entwickelte Wärmemenge nahezu umgekehrt, wie die Grösse der Oberfläche, auf welche sie vertheilt wird.

Da die im Draht entwickelte Wärmemenge der im ganzen Schliessungskreise entwickelten Energie und die Oberfläche der Capacität der Batterie proportional ist, so wird hierdurch der Satz 6), §. 74, bestätigt, welcher lautete, dass bei gleicher Elektricitätsmenge die Entladungsenergie sich verkehrt verhalte, wie die Capacität des Condensators.

Verfolgen wir nun eine Verticalreihe der Tabelle. Bei Anwendung von 2 Flaschen giebt die Elektricitätsmenge 2 die Depression 3,0. Die doppelte Elektricitätsmenge 4 giebt die Depression 13,4, also ungefähr die vierfache, die dreifache Elektricitätsmenge 6 giebt die Depression 26,8, also die neunfache Wirkung. Bei unveränderter Oberfläche (Capacität) der Batterie verhält sich also die Erwärmung im Platindraht wie das Quadrat der Elektricitätsmenge (Satz 5, §. 74), oder es ist

$$h = n \frac{q^2}{s},$$

wenn h die Depression der Flüssigkeitssäule, q die durch Funken der Maassflasche gemessene Ladung der Batterie und s die Anzahl der (unter sich gleichen) Flaschen bezeichnet, welche zur Batterie vereinigt sind. n ist ein constanter Factor, für welchen sich aus der obigen Versuchsreihe der Mittelwerth 1,76 ergiebt.

Riess fand ferner, dass die Temperaturerhöhungen verschiedener gleich langer Drähte desselben Metalls sich umgekehrt verhalten wie die Biquadrate ihrer Halbmesser, oder mit anderen Worten, dass die Temperaturerhöhungen den Quadraten der Querschnitte umgekehrt proportional sind. In einem 2 mal, 3 mal etc. dickeren Drahte wird also derselbe Entladungsschlag eine 16 mal, 81 mal etc. geringere Temperaturerhöhung hervorbringen; da aber die Massen dieser Drähte 4 mal, 9 mal grösser sind, so ist klar, dass die in denselben frei werdende Wärmemenge 4 mal, 9 mal etc. geringer ist als in einem Drahte von einfacher Dicke. Ist also w_1 die Wärmemenge bei einem Drahte von der Dicke 1, so ist die Wärmemenge w_d in einem Drahte von der Dicke d gegeben durch

$$w_d = \frac{w_1}{d^2}.$$

Wenn der Draht in der Thermometerkugel unverändert bleibt, so wird bei Entladung derselben Elektricitätsmenge die Erwärmung des Drahtes in der Kugel um so geringer, je länger man den Schliessungsbogen macht und je dünnere Drähte man in denselben einschaltet.

Um den Einfluss der Verlängerung des Schliessungsbogens zu untersuchen, schaltete Riess mittelst des Henley'schen Ausladers der Reihe nach verschieden lange Stücke desselben Kupferdrahtes in den Schliessungsbogen ein, während im Thermometer stets derselbe Platindraht blieb. Mit jeder Einschaltung wurde nun eine Versuchsreihe in der Art gemacht, wie die auf voriger Seite angeführte. Wir wollen die Länge des eingeschalteten Kupferdrahtes (welcher nahe 0,6 mm dick war) mit λ bezeichnen.

Für $\lambda = 0$ Meter ergab sich $h = 1{,}56 \frac{q^2}{s}$

" $\lambda = 3{,}03$ " " " $h = 1{,}38 \frac{q^2}{s}$

" $\lambda = 15{,}48$ " " " $h = 0{,}96 \frac{q^2}{s}$

" $\lambda = 31{,}09$ " " " $h = 0{,}68 \frac{q^2}{s}$

" $\lambda = 46{,}67$ " " " $h = 0{,}54 \frac{q^2}{s}$

" $\lambda = 77{,}86$ " " " $h = 0{,}42 \frac{q^2}{s}$.

Wir sehen aus dieser Zusammenstellung, dass die Erwärmung mit zunehmender Länge des Einschaltungsdrahtes für gleiche Werthe von $\frac{q^2}{s}$ fortwährend abnimmt.

Die Werthe von h sind offenbar den Factoren von $\frac{q^2}{s}$ proportional. Für $\frac{q^2}{s} = 1$ besteht zwischen h und λ folgende Beziehung:

$$h = \frac{1{,}56}{1 + 0{,}041\,\lambda} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

Für $\lambda = 0$ giebt diese Gleichung $h = 1{,}56$; für $\lambda = 15{,}48$ giebt sie $h = 0{,}95$; für $\lambda = 46{,}67$ giebt sie 0,53 etc., also lauter Werthe, die mit den oben mitgetheilten Beobachtungsresultaten sehr gut stimmen, so dass wir diese Gleichung wirklich für den Ausdruck der Beziehung zwischen h und λ nehmen können.

Die Gleichung 1) auf allgemeine Form gebracht, heisst

$$h = \frac{a}{1 + b\lambda},$$

woran Riess folgende Betrachtung anschliesst.

Durch Verlängerung des Schliessungsbogens wird die Erwärmung vermindert. Schaltet man nun aber statt eines Metalldrahtes ein Stück feuchten Holzes oder eine mit Wasser gefüllte Glasröhre als Zwischenleitung ein, so sind die stärksten Ladungen der Batterie nicht mehr im Stande, auch nur eine Senkung von 0,2 mm zu bewirken. Hier aber ist die Entladung der Batterie nicht mehr momentan, wie bei der Einschaltung des längsten Kupferdrahtes, sie erfordert eine wahrnehmbare Zeit. Daraus lässt sich schliessen, dass wir auch einen Unterschied in der Entladungszeit beobachten würden, je nachdem ein kurzer oder ein langer Kupferdraht eingeschaltet ist, wenn wir mit schärferen Sinnen begabt wären. Die Erwärmung des Platindrahtes im Thermometer scheint mit der Zeit, welche die Entladung dauert, im einfachen umgekehrten Verhältniss zu stehen. Ist eine Erwärmung a beobachtet worden, indem eine gewisse Elektricitätsmenge von gewisser Dichtigkeit in der Zeit 1 entladen wurde, so wird die Entladungszeit um $b\lambda$ vergrössert, wenn ein Draht von der Länge λ eingeschaltet wird, und die Erwärmung ist nun

$$h = \frac{a}{1 + b\lambda},$$

oder die Erwärmung eines Drahtes durch die Entladung der elektrischen Batterie ist der Dauer der Entladung umgekehrt proportional; die Dauer der Entladung wird durch Verlängerung des Schliessungsdrahtes um eine Zeit verzögert, welche der zugesetzten Drahtlänge proportional ist.

Wenn in den Schliessungsbogen der Reihe nach mittelst eines Henley'schen Ausladers gleich lange und gleich dicke Drähte verschiedener Metalle eingeschaltet werden, so wird durch Entladung gleicher Ladungen der Batterie der Draht in der Thermometerkugel sehr ungleiche Erwärmungen erfahren, die eingeschalteten Drahtstücke verzögern also die Entladung nicht gleich stark. Hat man einmal einen Kupferdraht, dann einen Platindraht von gleicher Länge und Dicke eingeschaltet, so wird für den Kupferdraht eine stärkere Erwärmung in der Thermometerkugel wahrgenommen werden; wenn man aber bei gleicher Dicke den Platindraht im Auslader 6,44 mal kürzer macht als den Kupferdraht, so beobachtet man unter sonst gleichen Umständen für beide eine gleiche Temperaturerhöhung des Platindrahtes in der Thermometerkugel; ein Platindraht verzögert also die elektrische Entladung gerade ebenso stark, wie ein gleich dicker 6,44 mal längerer Kupferdraht, das Platin hat also eine 6,44 mal stärkere Verzögerungskraft als das Kupfer, oder auch die Leitungsfähigkeit des Platins ist 6,44 mal geringer als die des Kupfers.

Riess hat den specifischen Leitungswiderstand verschiedener Metalle durch zahlreiche Versuche ermittelt, welche sich auf das eben angedeutete Princip stützen. Wir werden weiter unten ausführlicher davon reden.

Als im Thermometer sich ein Platindraht von 118 mm Länge und 0,082 mm Radius, im Auslader aber ein Kupferdraht von 284 mm Länge

und 0,084 mm Halbmesser befand, gab eine der obigen ähnliche Beobachtungsreihe

$$h = 3{,}02 \frac{q^2}{s}.$$

Wurden nun die Drähte vertauscht, so dass der Kupferdraht im Thermometer, der Platindraht aber im Auslader war, so kam

$$h = 0{,}92 \frac{q^2}{s}.$$

Derselbe Entladungsschlag bringt also in beiden Drähten sehr ungleiche Erwärmungen hervor. Aus diesen und ähnlichen mit anderen Metallen angestellten Versuchen gelangte Riess, alle hier influirenden Umstände in Rechnung ziehend, zu dem Resultat, dass die durch den elektrischen Entladungsschlag caeteris paribus in den Drähten frei werdende Wärmemenge der verzögernden Kraft dieser Metalle proportional ist.

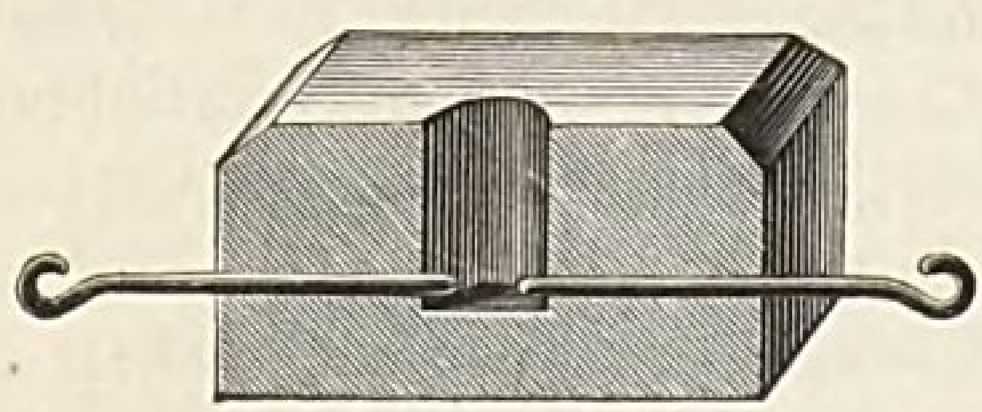
Es sind schon oben im Allgemeinen die Wirkungen angeführt worden, welche ein starker Entladungsschlag hervorbringt, wenn er durch einen dünnen Metalldraht hindurchgeführt wird. Auch diese Effecte hat Riess einer genaueren Prüfung unterworfen und hat gezeigt, dass die Schmelzung nicht eine directe Wirkung der Erwärmung durch den Entladungsschlag sein kann. Von seinen Beobachtungen der Temperaturerhöhung etwas dickerer Drähte für schwächere Ladungen ausgehend, konnte Riess die Temperaturerhöhung eines dünnen Drahtes bei stärkerer Ladung berechnen, es ergab sich durch diese Rechnung 211^0 für die Temperaturerhöhung eines Platindrahtes bei einem Entladungsschlage, welcher den Draht schmolz. Eine solche Temperatur ist aber nicht zum Glühen, viel weniger zum Schmelzen des Platins hinreichend; das Metall schmilzt schon, ehe es durch Steigerung seiner Temperatur schmelzen würde; in der Schmelzung erkennt deshalb Riess eine elektrische Wirkung, die von der Erwärmung durch Elektricität getrennt ist.

Bei fortgesetzter Steigerung der Ladung treten noch vor dem Eintreten des Glühens eine Reihe von Erscheinungen am Drahte auf, welche auf ein gewaltsames Eindringen, auf eine mechanische Wirkung der Elektricität hindeuten. Der Draht wird sichtbar erschüttert, es treten kleine Funken an seinen Enden auf, es werden von seiner Oberfläche Theilchen losgerissen, die sich in Gestalt eines dichten Dampfes von ihm erheben, der Draht erhält scharfe Einbiegungen, die mit der Stärke der Ladung an Zahl und Stärke zunehmen, endlich bei immer mehr gesteigerter Ladung wird er rothglühend, weissglühend, er wird zerrissen und zersplittert. Bei Platindrähten zeigen die Stücke oft noch keine Schmelzung, die erst bei noch stärkeren Ladungen auftritt; die Zerreissung geht also der Schmelzung voran. Bei leicht oxydirbaren Metallen steigert sich die Temperatur noch durch Aufnahme von Sauerstoff, und diese erhöhte Temperatur erleichtert dann auch die Schmelzung.

Ueberall, wo die elektrische Schmelzung eintritt, ist eine mechanische Trennung der geschmolzenen Masse sichtbar, die Schmelzung kann daher nur als Wirkung der Hitze auf sehr fein zertheiltes Metall betrachtet werden. Die Elektricität schmilzt die Metalle durch gleichzeitige Zersplitterung und Erhitzung.

84 **Anwendung des Entladungsschlages in der Sprengtechnik.** Die Unsicherheit der Entzündung von Pulverminen mittelst der gewöhnlichen Zündschnüre hat veranlasst, dieselbe durch den Entladungsschlag einer Leydener Flasche zu bewerkstelligen. Um als Vorleseversuch die Entzündung des Schiesspulvers zu zeigen, wendet man die Vorrichtung Fig. 225 an. In ein Holzklötzchen ist ein Loch von ungefähr $1^1/_2$ cm Durchmesser und 3 cm Tiefe gebohrt, welches ungefähr zur Hälfte mit Pulver gefüllt wird. Durch zwei seitliche, diametral einander gegenüberstehende Löcher ragen zwei ungefähr 2 mm dicke Messingdrähte in den unteren Theil dieser Höhlung hinein. Der eine dieser aussen etwas umgebogenen Drähte ist mit der äusseren Belegung der Batterie in Verbindung gebracht, während von dem anderen aus eine leitende Verbindung mit der inneren Belegung hergestellt wird. Der Entladungsfunken geht nun in der oben erwähnten Höhlung zwischen den einander gegenüberstehenden Drahtenden über. Zur Entzündung des Pulvers ist nicht nur eine starke Ladung der Batterie, sondern eine Verzögerung der Entladung nöthig, welche dadurch bewirkt wird, dass man an einer beliebigen Stelle eine feuchte Schnur, einen durchnässten Bindfaden, einschaltet. Wenn der ganze Schliessungsbogen metallisch ist, wie gewöhnlich, so wird das Pulver bloss aus einander geworfen und nicht entzündet.

Fig. 225.



Um schon mit schwächeren Funken Pulver entzünden zu können, braucht man nur die Enden der Drähte, zwischen welchen sie überspringen sollen, mit Knallquecksilber oder noch besser mit chlorsaurem Kali und Schwefelantimon zu bedecken. Der praktischen Anwendbarkeit der Reibungselektricität stand bisher nur die nachtheilige Einwirkung einer feuchten Atmosphäre auf die Wirksamkeit der Elektrisirmaschine entgegen.

Mechanikus Bornhardt in Braunschweig hat eine Zünd-Elektrisirmaschine construirt, welche zum Zünden der Minen für militärische und bergmännische Zwecke bei jeder Witterung, selbst in feuchten Gruben, stets brauchbar ist. Dieselbe ist in Fig. 226 in $^1/_6$ der natürlichen Grösse im Verticaldurchschnitt und in der Vorderansicht und in Fig. 227 in der äusseren Ansicht dargestellt.

Die Glasscheibe der gewöhnlichen Maschine ist durch eine Scheibe *B* von gehärtetem Kautschuk ersetzt, während das Reibzeug unter

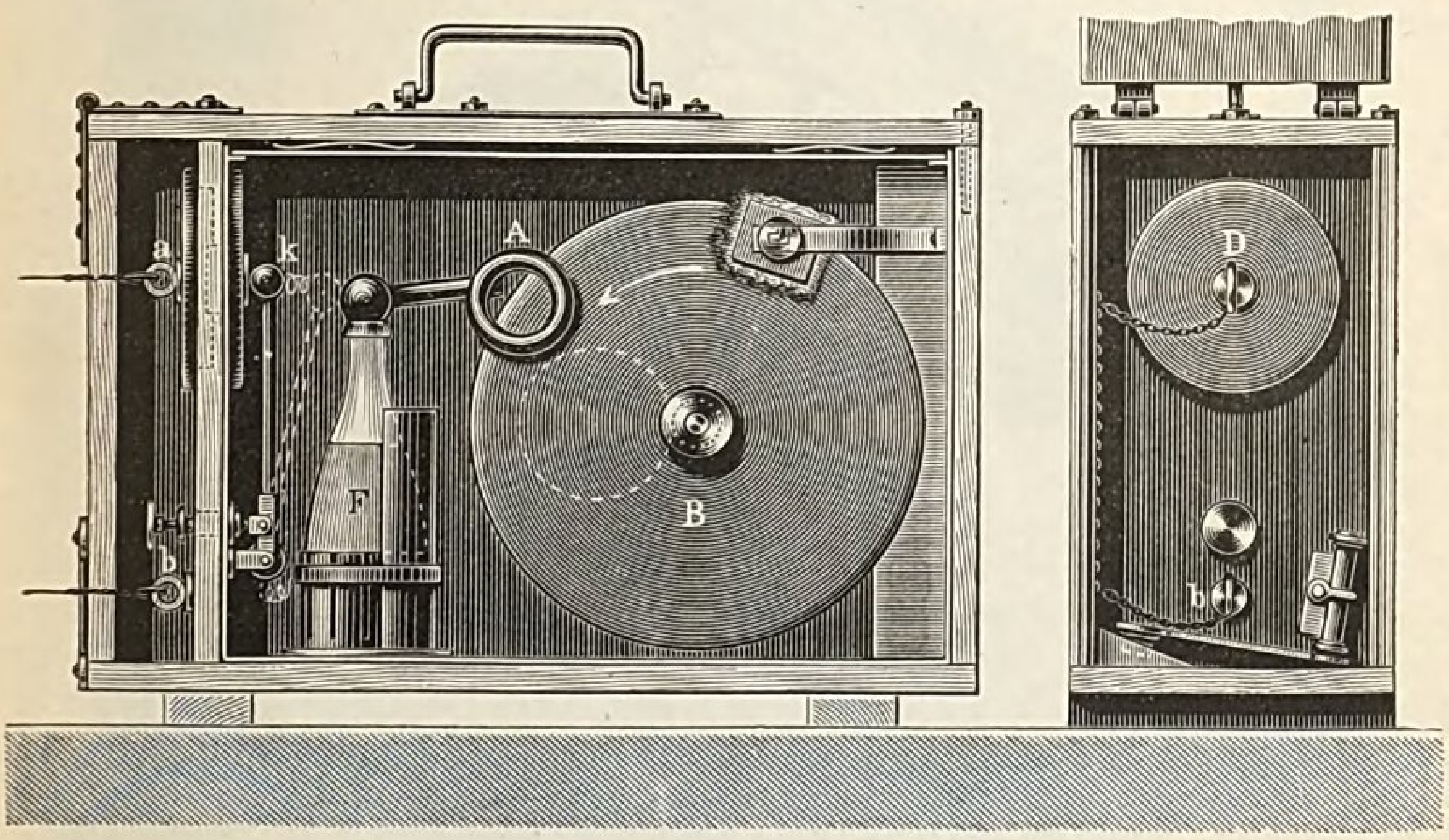
Vermeidung des Amalgams durch eigenthümlich präparirtes Pelzwerk gebildet wird. — Die Saugarme *A* sitzen unmittelbar auf der kleinen Leydener Flasche *F*.

Das Wesentlichste des Apparates beruht aber auf dem luftdichten Verschluss eines die ganze Maschine umgebenden Blechkastens. Oben ist der Blechkasten durch eine Glasplatte mittelst Schrauben hermetisch verschlossen. Das Ganze ist in einen mit amerikanischem Ledertuch überzogenen Holzkasten eingeschlossen.

Die eiserne Axe der Scheibe *B* geht durch eine Stopfbüchse in der Rückwand des Kastens hindurch, und auf das ausserhalb des Kastens befindliche Ende derselben wird die Kurbel aufgeschraubt, durch welche die Drehung der Scheibe bewirkt wird.

Das Reibzeug, sowie die äussere Belegung der Flasche sind mit dem Blechkasten und also auch mit dem Metallring *b* in leitender Verbindung,

Fig. 226.



in welchen das eine Ende der zum Zünder führenden Drahtleitung eingehängt wird.

Das andere Ende der Drahtleitung wird an dem Ring *a* befestigt, welcher mit einem verticalen Messinghebel, der die Kugel *k* trägt, in leitender Verbindung steht, aber von dem Blechkasten durch eine Platte von gehärtetem Kautschuk isolirt ist.

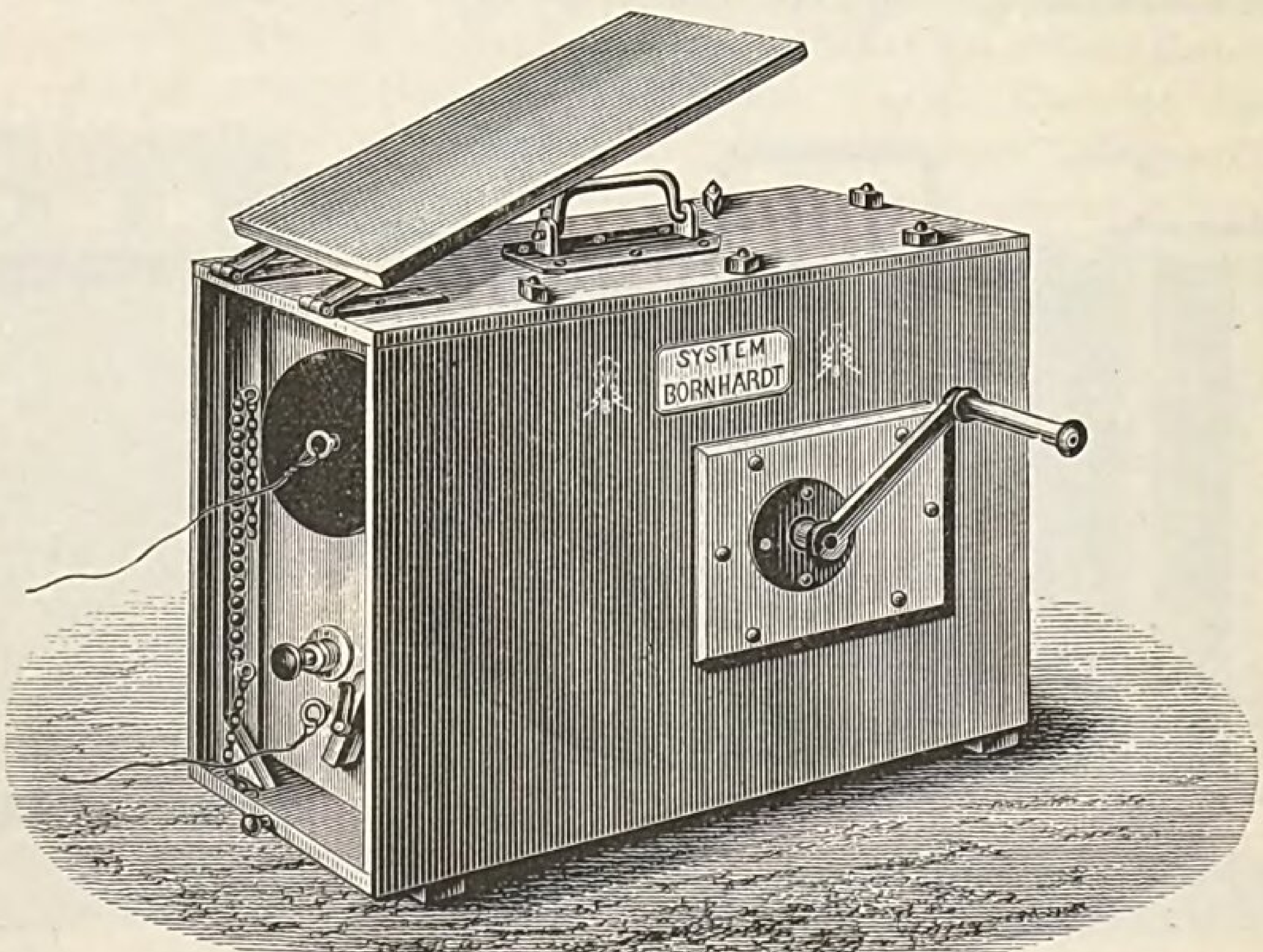
Um die Mine zu entzünden, werden zuerst die Zuführungsdrähte bei *a* und *b* eingehängt, dann erst die Kurbel angesetzt und mehrmals gedreht, hierauf durch Drücken auf den Knopf oberhalb *b* die Flasche entladen.

Um die erforderliche Ladung und den guten Zustand des Apparates vor dem Gebrauche zu prüfen, schaltet man mittelst der daran hängenden

Kettchen die in der Fig. 227 sichtbare Reihe von Unterbrechungsstellen (eine Reihe abstehender Metallknöpfe) ein, und überzeugt sich, ob der Funken an allen Unterbrechungsstellen überschlägt.

Die Zünder, welche Bornhardt verwendet, um die Explosion der Minen zu bewirken, haben folgende Einrichtung: Auf einen Papierstreifen, welchen Fig. 228 darstellt, ist ein kleiner Stanniolstreifen *c d* aufgeklebt und dann das Ganze bei *a* anfangend so aufgerollt, dass *b* das äussere Ende des so erhaltenen Papiercylinders bildet. Auf diesen Cylinder wird dann das Zündhütchen *g*, Fig. 229, aufgesetzt, die Höhlung des Ganzen mit Knallsatz (2 Theile *Antimonium crudum* mit 7 Theilen chlorsaurem Kali — vorsichtig gemischt!) gefüllt und dann der Papiercylinder andererseits durch das Zündhütchen *h* geschlossen. Der

Fig. 227.



so erhaltene Zünder, Fig. 232, wird nun an einem Holzstäbchen von 15 mm Breite, 11 mm Dicke und je nach Umständen 60 bis 120 cm Länge in der Weise befestigt, wie die Figuren 229 und 230 anschaulich machen, welche uns das unterste Ende des Holzstabes zeigen. Unten wird der Stab etwas eingekerbt, wie Fig. 230 zeigt, in diese Kerbe wird die Sprenghülse *g h* eingelegt und durch zwei ungefähr 0,3 mm dicke ausgeglühte Eisendrähte *n o q p* und *n' o' q' p'* befestigt, deren eines Ende durch einen kleinen Nagel *n* (und *n'* auf der anderen Seite des Stabes) befestigt ist, während die Drähte, soweit sie den Stab entlang laufen, in Rinnen eingelassen sind, die man längs der Holzstäbe gezogen hat. Ist z. B. das Drahtende —*p* mit der äusseren Belegung einer Leydener

Flasche in Verbindung, so erfolgt eine Entladung, sobald $+p$ mit der inneren Belegung derselben in leitende Verbindung gebracht wird. Der Funken springt vom Zündhütchen *h* durch den Knallsatz zum Stanniolstreifen im Papiercylinder, andererseits vom Stanniolstreifen zum Zündhütchen *g* über, wodurch die Explosion eingeleitet wird.

Um eine Sprengung vorzunehmen, wird das Bohrloch mit der Hälfte des Pulversatzes gefüllt, der Stab eingesetzt, so dass *g h* mit dem Pulver in Berührung kommt, der Rest des Pulversatzes aufgeschüttelt und endlich das Bohrloch mit trockenem Sand gefüllt. Wenn sich das Pulver nicht gut einschütten lässt, verfährt man, wie Fig. 231 erläutert. Man

Fig. 228.



Fig. 229.

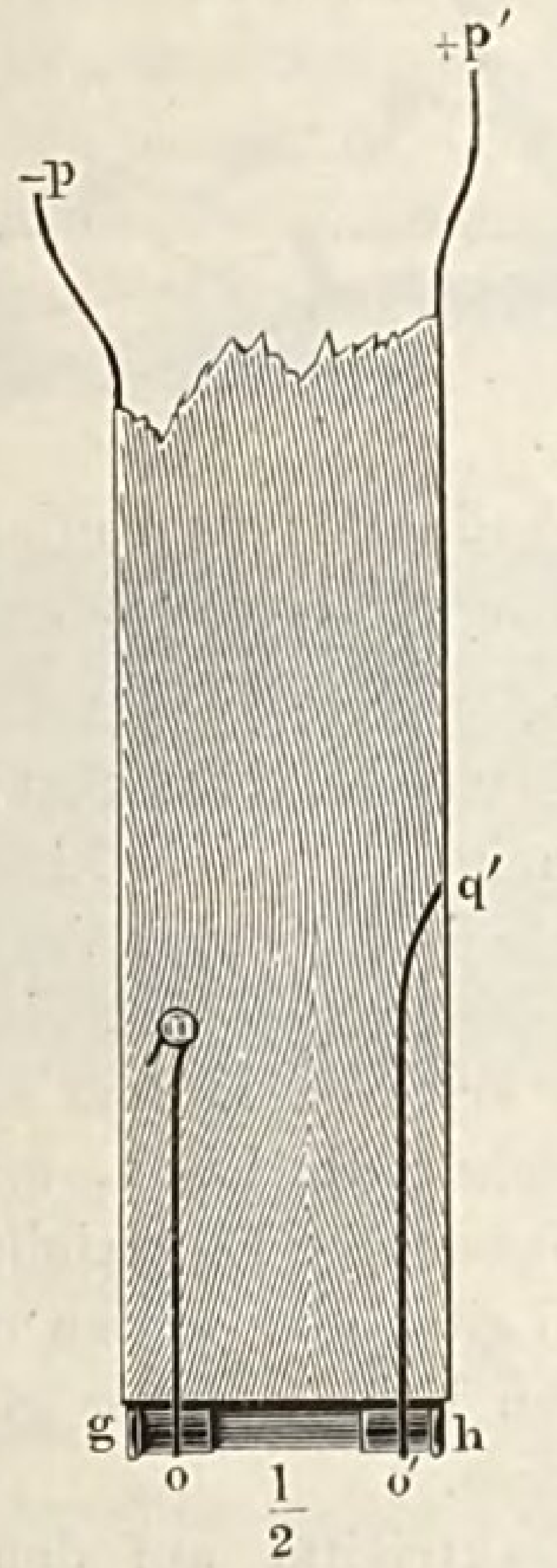


Fig. 230.

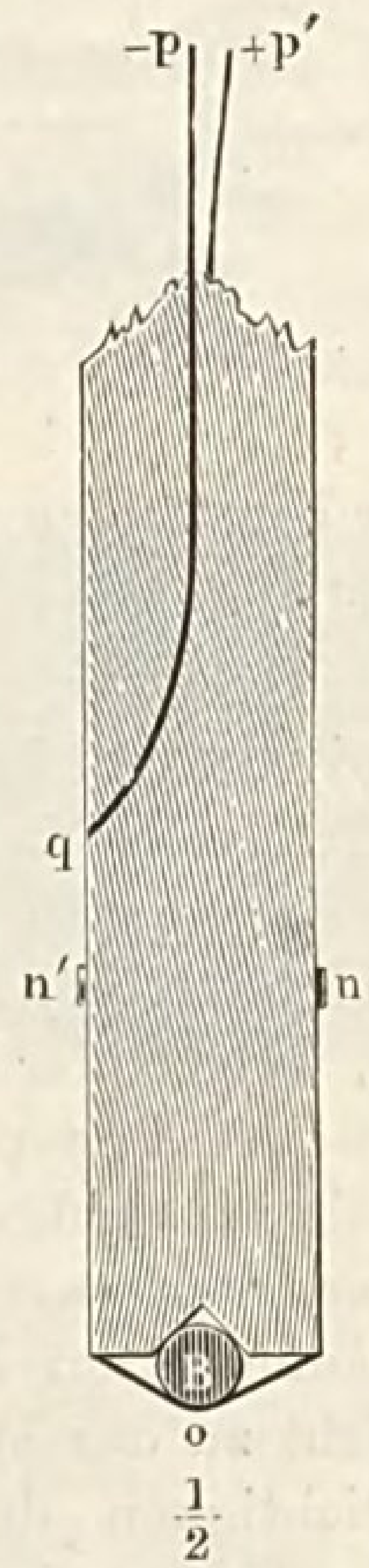
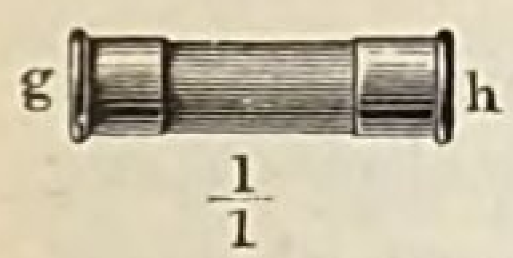


Fig. 231.



Fig. 232.



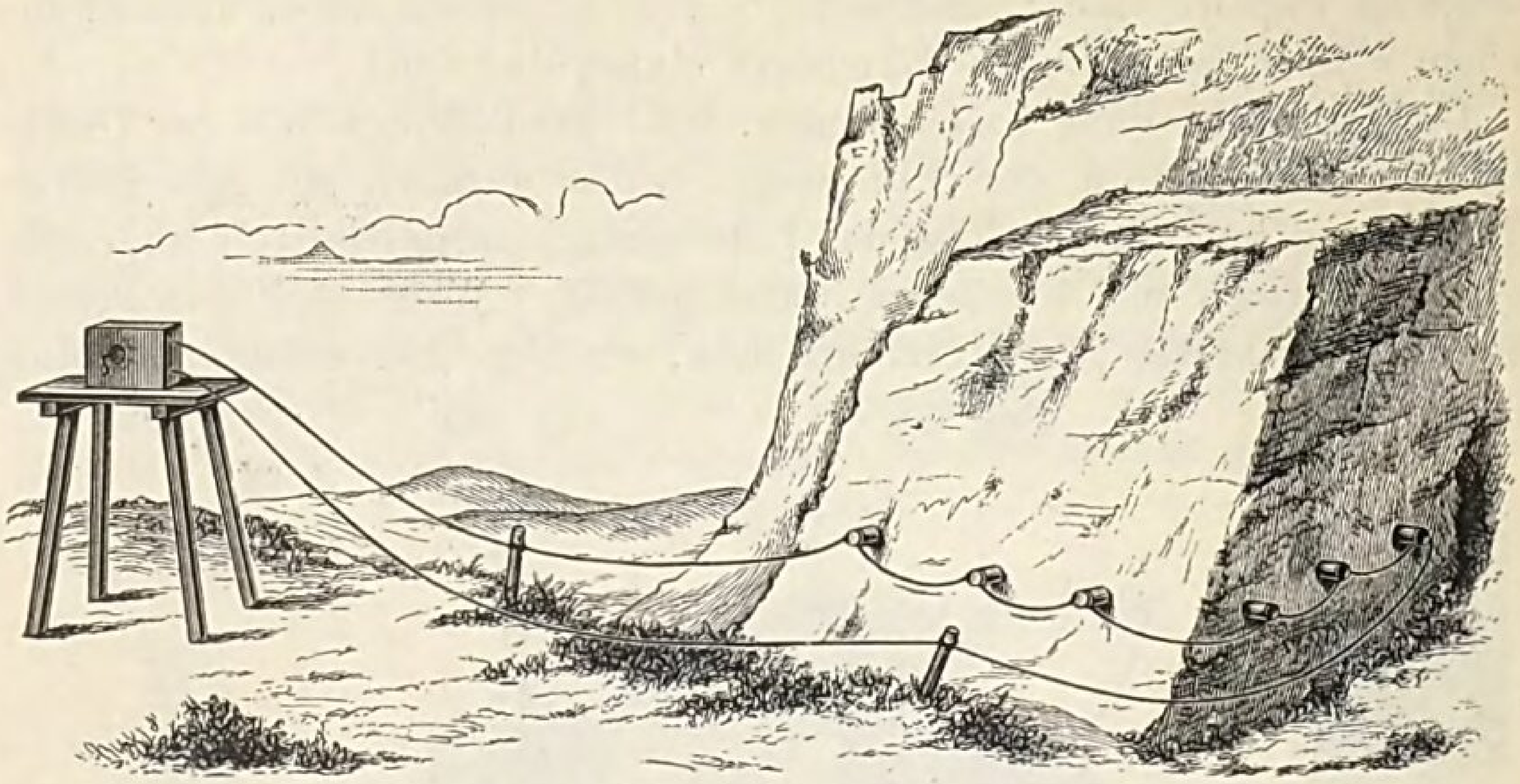
füllt das Pulver in eine Papierhülse, welche den Zünder umschliesst, steckt diese in das Bohrloch und füllt dasselbe mit Sand an.

Die Enden *p* und *p'* der beiden Drähte des Sprengstabes werden mittelst Eisendrähten zu den Knöpfen der Bornhardt'schen Elektrisirmaschine geführt. Um zu verhindern, dass sie den feuchten Boden berühren, werden sie stellenweise um trockene Holzstäbe gewickelt, wie Fig. 233 (a. f. S.) erläutert.

Der Vortheil der elektrischen Entzündung beruht einmal auf der Sicherheit, da man erst, wenn Alles vorbereitet und die Arbeiter vom Platze entfernt sind, die Drähte mit der Maschine verbindet; dann insbesondere auf der Möglichkeit der absolut gleichzeitigen Entzündung

mehrerer Minen, wodurch ihre Wirksamkeit sehr erhöht wird und grössere Steintrümmer erhalten werden. Statt der Entladung der Leydener

Fig. 233.



Flasche wird unter Umständen vortheilhafter der Entladungsfunken eines Inductionsapparates angewendet, den wir später kennen lernen werden.

85 **Lichterscheinungen bei der elektrischen Entladung, der elektrische Funken.** Wenn man einen mit Elektricität geladenen Leiter einem anderen mit dem Boden in leitender Verbindung stehenden nähert, so wird letzterer, wie wir gesehen haben, sich mit gebundener Elektricität laden, welche der des ersteren Leiters entgegengesetzt ist. Die Ladung des zweiten Leiters wächst, die Kraft, mit welcher die einander gegenüberstehenden entgegengesetzten Elektricitäten sich anziehen, nimmt zu, wenn man den zweiten Leiter dem ersten nähert, bis endlich die elektrische Spannung auf beiden Leitern gross genug wird, um die isolirende Luftschicht zu durchbrechen.

Wenn die Dichtigkeit der Elektricität auf den beiden einander gegenüberstehenden Leitern bedeutend war, und eine verhältnissmässig grosse Quantität Elektricität zwischen denselben übergeht, so ist dieser Uebergang von einer glänzenden Lichterscheinung, dem elektrischen Funken, und von einem mehr oder weniger lebhaften, scharfen Knall begleitet. Wir wollen hier nur die äusseren Verhältnisse des elektrischen Funkens näher betrachten, und eine Untersuchung über das Wesen desselben und über die Natur des elektrischen Lichts überhaupt in einem späteren Capitel besprechen.

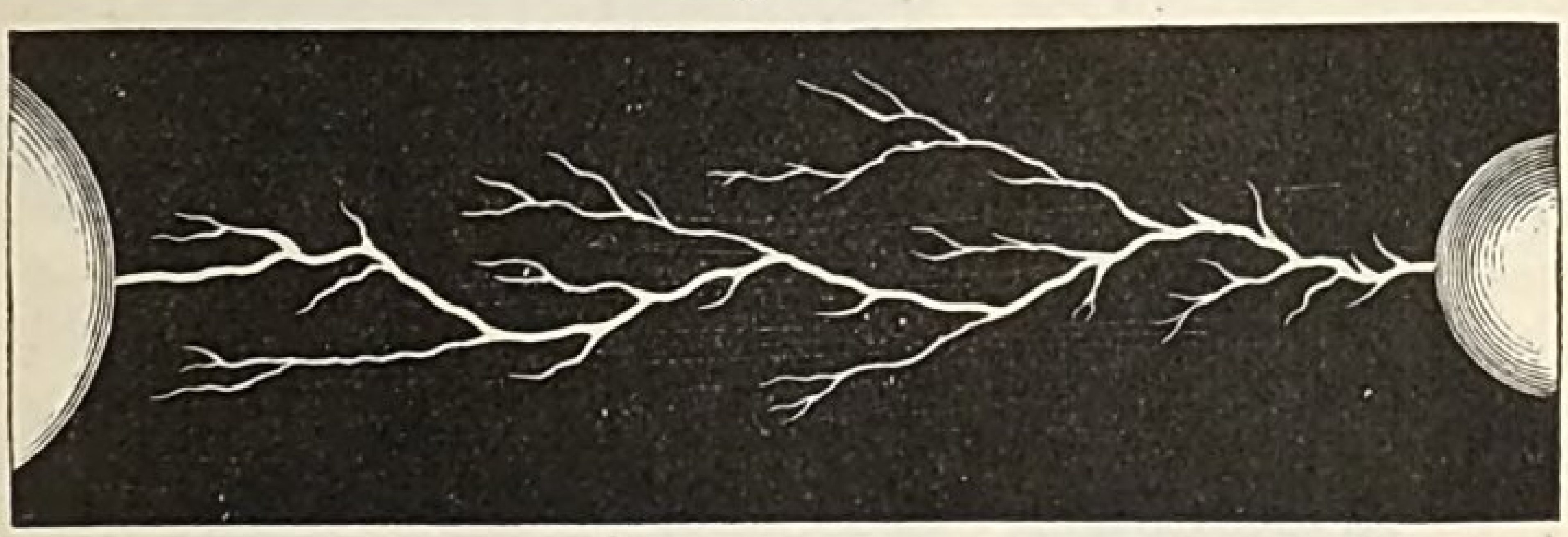
Sehr hell glänzend ist der Entladungsfunken einer stark geladenen Leydener Flasche oder einer Batterie, weil hier bei nicht sehr grosser Schlagweite die Menge der übergehenden Elektricität eine sehr bedeutende ist; die Bahn dieses sehr intensiven Funkens ist geradlinig, seine Farbe weiss.

Der Funken, welchen man von dem Conductor der Elektrisirmaschine erhält, kann eine viel bedeutendere Schlagweite erreichen, dagegen ist seine Lichtstärke viel geringer, weil zwar die Spannung der auf dem Conductor angehäuften Elektricität eine sehr bedeutende, ihre Gesammtmenge aber doch verhältnissmässig gering ist.

Bei etwas bedeutenderer Schlagweite hört auch der Conductorfunken auf geradlinig zu sein, er nimmt eine unregelmässige, zackige oder ästige Gestalt an, wie Fig. 234 zeigt, welche den Funken der Van Marum'schen Maschine in $^1/_8$ der natürlichen Grösse darstellt, der Funken schlägt hier von einer kleinen am Conductor befindlichen Kugel zu einer grösseren des Funkenziehers über.

Die Farbe des Funkens, welchen der Conductor der Elektrisirmaschine liefert, hängt ab theils von der Natur des Metalls, aus dem die Kugeln gefertigt sind, zwischen denen der Funken überspringt, theils von der Natur des Gases, welches den Zwischenraum zwischen den Kugeln ausfüllt. In Luft ist die Farbe des Conductorfunkens etwas bläulich, in Wasserstoff ist sie nach Faraday röthlich, in Kohlensäure grünlich etc.

Fig. 234.



Wir werden später noch einmal auf den Einfluss des Gases auf die Farben des Funkens zurückkommen.

Um die Funken zu vervielfältigen, muss man den Leiter, durch welchen die Elektricität vom Conductor in den Boden überströmt, oft unterbrechen; darauf beruhen mehrere Spielereien.

Mit Metallperlen, die auf einem Seidenfaden aufgereiht sind, jedoch so, dass jede Metallperle von der folgenden durch Glasperlchen getrennt ist, kann man Namenszüge und allerlei Figuren bilden, welche so lange leuchten, als man die Maschine dreht, von deren Conductor die Elektricität durch diese Kette in den Boden strömt.

Wenn man nach Grüel's Angabe eine Kette, deren Glieder aus nicht zu dickem Eisendraht verfertigt sind, als Theil des Schliessungsbogens bei der Entladung einer Leydener Flasche anwendet, so sprüht jeder einzelne Ring Fünkchen aus, welche die charakteristische Verbrennungserscheinung des Eisens zeigen.

Blitzröhren, Fig. 235 (a. f. S.), sind Glasröhren, auf welche man rautenförmige Stanniolblättchen so aufgeklebt hat, dass zwischen zwei einander zugekehrten Spitzen ein kleiner Zwischenraum bleibt, wie

Fig. 236 zeigt. Gewöhnlich klebt man sie oder kreisförmige Plättchen so auf, dass sie eine um die Röhre laufende Schraubenlinie bilden.

Wenn man das eine Ende einer solchen Röhre in der Hand haltend, das andere an den Conductor der Maschine bringt, während sie gedreht wird, so sieht man im Dunkeln fortwährend zwischen je zwei Rauten Funken überspringen, so dass eine fast zusammenhängende Lichtlinie auf der Röhre erscheint.

Eine Blitztafel ist in Fig. 237 dargestellt. Eine Glasplatte ist auf beiden Seiten mit Stanniol belegt, ganz wie wir es bei der Franklin'schen Tafel gesehen haben; die vordere Belegung, auf deren Mitte eine Messingplatte mit einem Häkchen aufgekittet sein muss, ist durch zwei Reihen sich kreuzender Schnitte von ungefähr $^1/_2$ mm Breite in einzelne rautenförmige Stückchen getheilt. Wird nun die hintere Fläche zum Boden abgeleitet, der Haken an der vorderen aber mit dem Conductor der Elektrisirmaschine in Verbindung gebracht, so kann eine Ladung des Apparates nur dadurch zu Stande kommen, dass die Elektricität auf der Vorderfläche von einer Raute zur anderen überspringt, was zur Folge hat, dass von der Mitte aus Blitze die ganze Tafel nach allen Seiten hin durchzucken. Besonders glanzvoll zeigt sich die Erscheinung bei einer raschen Entladung der Tafel.

Fig. 235.

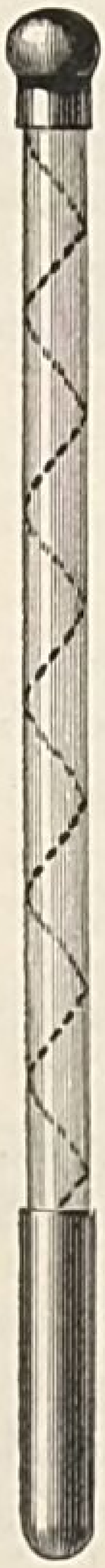
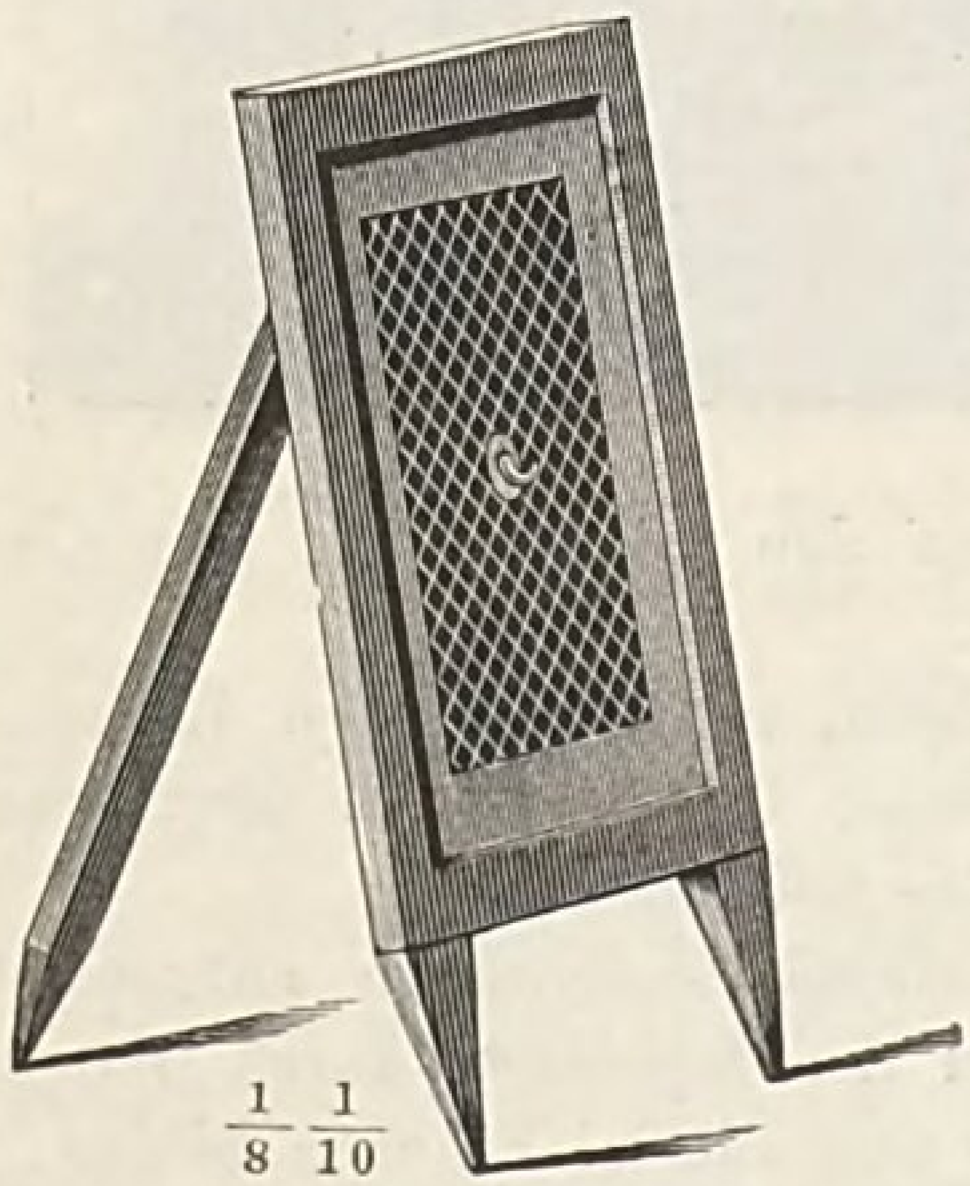


Fig. 236.



Fig. 237.



$\frac{1}{8}$ $\frac{1}{10}$

Da die Franklin'sche Tafel bei etwas grösseren Dimensionen zerbrechlich wird, wenn sie auf die gewöhnliche Weise aufgestellt ist, so kann man sie in eine staffeleiartige Fassung bringen, wie Figur 237 zeigt.

Man hat diese Spielereien noch auf mannigfache Weise abgeändert, diese Beispiele mögen jedoch genügen.

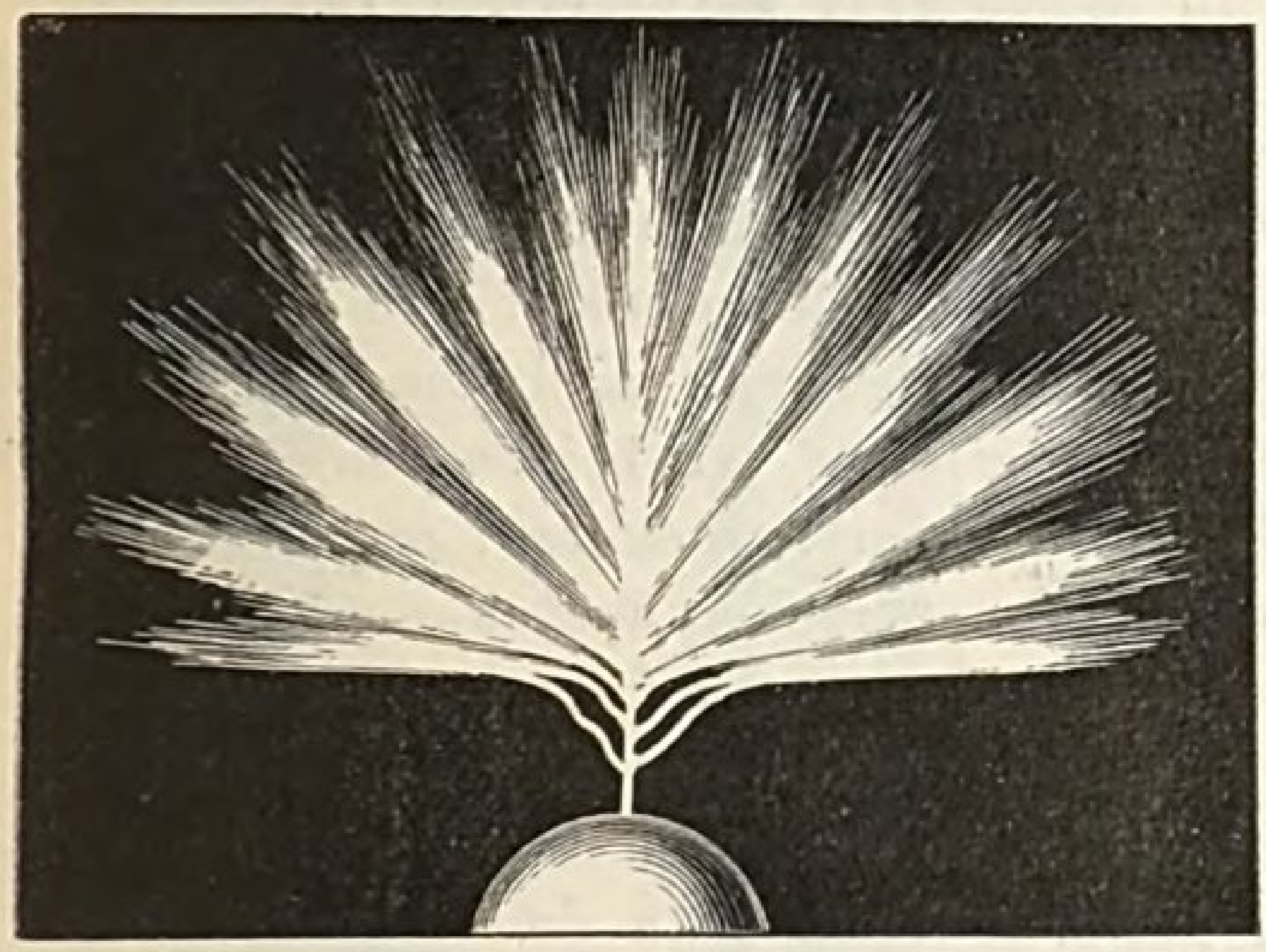
Wenn man den Conductor der Elektrisirmaschine mit einer kleinen Kugel von 6 bis 12 mm Durchmesser versieht und derselben eine zum Boden abgeleitete Metallfläche oder die Hand nähert, so erhält man stark verästelte Funken, die bei grösserer Annäherung in gewöhnliche Funken übergehen. Wenn die Maschine recht kräftig wirkt, so gehen diese verästelten Funken mehr und mehr in einen förmlichen, nur im

Dunkeln bemerkbaren Büschel über, der aber noch deutlich aus einzelnen mit Geräusch überschlagenden verästelten Funken besteht. Das Ausströmen der Elektricität wird um so gleichförmiger, je stärker die Maschine wirkt, oder je kleiner die Kugel ist. Hat die Kugel eine der Kraft der Maschine entsprechende Grösse, so ist die Anhäufung der Elektricität in derselben so stark, dass büschelförmige Ausströmungen selbst gegen Halbleiter, wie Holz etc., ja gegen die Luft allein stattfinden.

Van Marum's berühmte Maschine ist so kräftig, dass sie aus einer Kugel von 9 cm Durchmesser einen Lichtbüschel von der Fig. 238 in $^1/_{10}$ der natürlichen Grösse abgebildeten Form liefert. Bei schwachen Maschinen erhält man die durch freie Ausstrahlung entstehenden Büschel am besten, wenn man auf den Conductor einen am Ende abgerundeten Messingstab von 2 bis 4 mm Durchmesser aufsetzt.

Je dünner das Ende des Metallstabes gemacht wird, welcher den Büschel geben soll, desto continuirlicher wird die Entladung, d. h. desto weniger sind einzelne Verzweigungen im Büschel zu unterscheiden, und desto kleiner wird der Büschel, der endlich in einen kleinen leuchtenden Punkt übergeht, wenn der Draht in eine Spitze ausläuft. Bei stärkeren Maschinen beobachtet man selbst am Ende etwas dickerer Stäbe ein gleichförmiges ruhiges Glimmen.

Fig. 238.



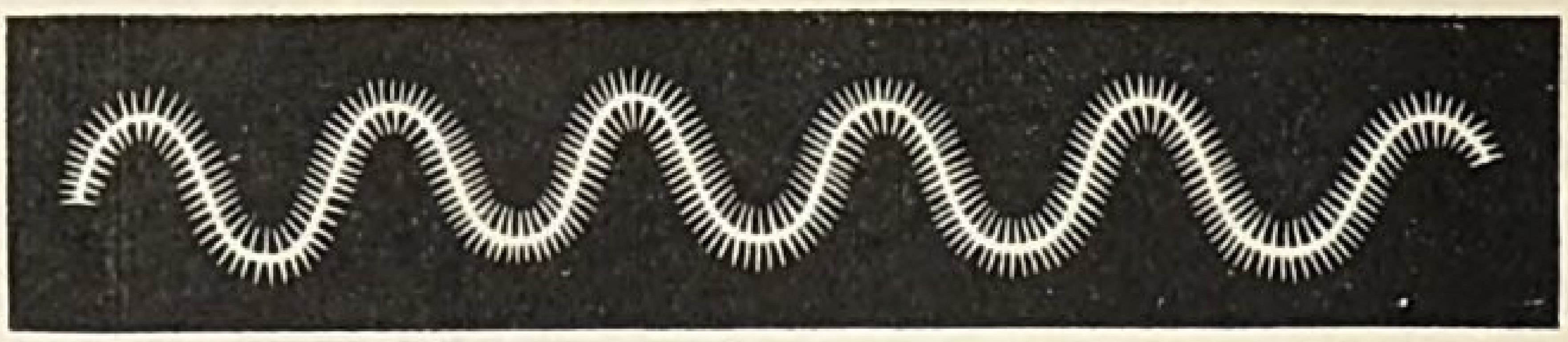
Für positive Elektricität sind die Büschel am grössten; ist der Conductor mit negativer Elektricität geladen, so sind die Büschel kleiner und gehen viel eher in einen kleinen leuchtenden Stern und in ruhiges Glimmen über.

Die Büschel erhält man nicht bloss, wenn man auf den Conductor der Elektrisirmaschine eine kleine Kugel oder einen abgerundeten Metallstab aufsetzt, sondern auch, wenn man eine kleine Kugel oder einen solchen Stab ableitend berührt und gegen den Conductor der Maschine hält; es strömt alsdann die durch Vertheilung im Stabende angehäufte Elektricität in Büschelform gegen den Conductor aus. Hält man eine Spitze dem Conductor entgegen, so erscheint an derselben der kleine leuchtende Stern.

Wenn man an den Funkenzieher einer kräftigen Elektrisirmaschine einen ganz dünnen Metalldraht hängt, welcher fast bis auf den Boden herabhängt, so wird dieser Draht im Dunkeln leuchtend, so oft ein Funken vom Conductor auf den Funkenzieher überspringt. Es schiessen dabei aus dem Drahte nach allen Seiten hin kurze Strahlen hervor;

Van Marum hat mit seiner trefflichen Maschine diese Erscheinung entdeckt und in grossem Maassstabe dargestellt. Fig. 239 stellt ein Stück von Van Marum's leuchtendem Drahte in verkleinertem Maass-

Fig. 239.



stabe dar. — Mit schwachen Maschinen lässt sich das Leuchten des Drahtes nicht hervorbringen, wenn sich derselbe nicht in einem luftverdünnten Raume befindet.

86 **Das elektrische Licht im verdünnten Raume.** Im luftverdünnten Raume schlägt der elektrische Funken auf grosse Entfernungen über und breitet sich in prachtvolle Lichtgarben von blassvioletter Farbe aus; die elektrischen Lichtbüschel werden viel grösser und schöner. Das Leuchten eines dünnen Drahtes lässt sich im luftleeren Raume schon mit schwächeren Maschinen hervorbringen.

Fig. 240 stellt einen unter dem Namen des elektrischen Eies bekannten Apparat dar, wie er häufig angewandt wird, um das elektrische Licht im verdünnten Raume zu zeigen. An beiden Enden eines elliptischen Glasgefässes sind Metallfassungen aufgekittet; die Fassung auf der einen Seite ist mit einem Hahn versehen und kann auf eine Luftpumpe aufgeschraubt werden. Die Fassung der anderen Seite ist mit einer Lederbüchse versehen, durch welche der mit dem Knopf *b* endigende Messingstab *cb* hindurchgeht, so dass man den Knopf *b* nach Belieben dem Knopfe *a* nähern kann. Wenn man den Apparat fast luftleer gemacht und die untere Fassung mit dem Boden in leitende Verbindung gebracht hat, so strömt die Elektricität in Form breiter Lichtbänder zwischen *b* und *a* über, so oft ein Funken vom Conductor der Maschine auf *c* überschlägt. Wenn man durch den Hahn etwas Luft einströmen lässt, so wird das Licht weniger diffus und bildet purpurfarbene Lichtbogen zwischen *b* und *a*. Je mehr Luft man einlässt, desto mehr nimmt die Ausdehnung der Lichterscheinung ab, sie nähert sich mehr und mehr der Form des gewöhnlichen elektrischen Funkens.

Sehr gut lassen sich auch die elektrischen Lichterscheinungen im verdünnten Raume einer Luftpumpenglocke darstellen, welche oben eine Messingfassung mit einer Stopfbüchse hat, durch welche ein Messingstab hindurchgeht, den man auf- und niederziehen kann, und an dessen unterem Ende eine Kugel oder irgend ein anders geformtes Metallstück angeschraubt ist.

Am bequemsten beobachtet man das elektrische Licht in verdünnten Gasen an den Geissler'schen Röhren, welche wir schon im II. Bande bei Gelegenheit der Spectralanalyse erwähnt haben. Da man sich dabei

meistens des Funkens der Inductionsapparate bedient, so behalten wir uns vor, an späterer Stelle noch Einiges über dieselben mitzutheilen.

D. Geissler hat übrigens auch evacuirte Glasröhren hergestellt, welche beim Reiben mit Seide im Inneren leuchten. Um die Erscheinung glänzender zu machen, erhalten diese Röhren meist noch eine Spirale aus fluorescirendem Glase.

Auch die Toricelli'sche Leere durchströmt die Elektricität mit Lichterscheinung.

Picard bemerkte zuerst, dass ein Barometer im Dunkeln leuchtet, wenn das Quecksilber auf und nieder schwankt, und bald überzeugte man sich, dass diese Erscheinung von der durch die Reibung des Quecksilbers an den Wänden der Röhre entwickelten Elektricität herrühre. Um das elektrische Licht in der Toricelli'schen Leere zu beobachten, construirte Cavendish das Fig. 241 dargestellte Doppelbarometer, dessen Anwendung wohl ohne weitere Erklärung verständlich ist.

Fig. 240.

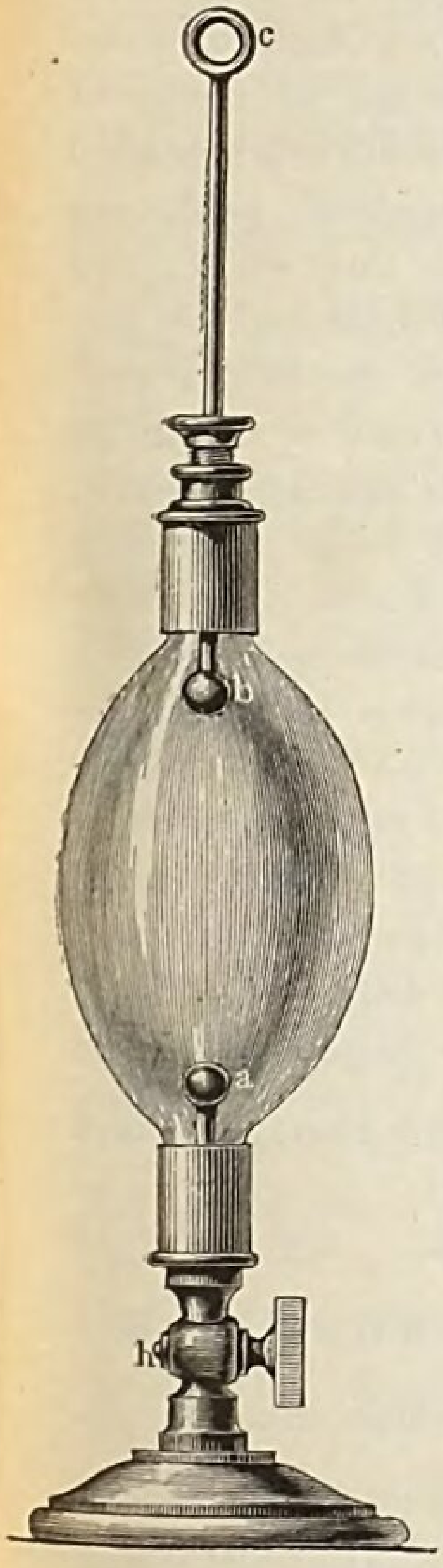
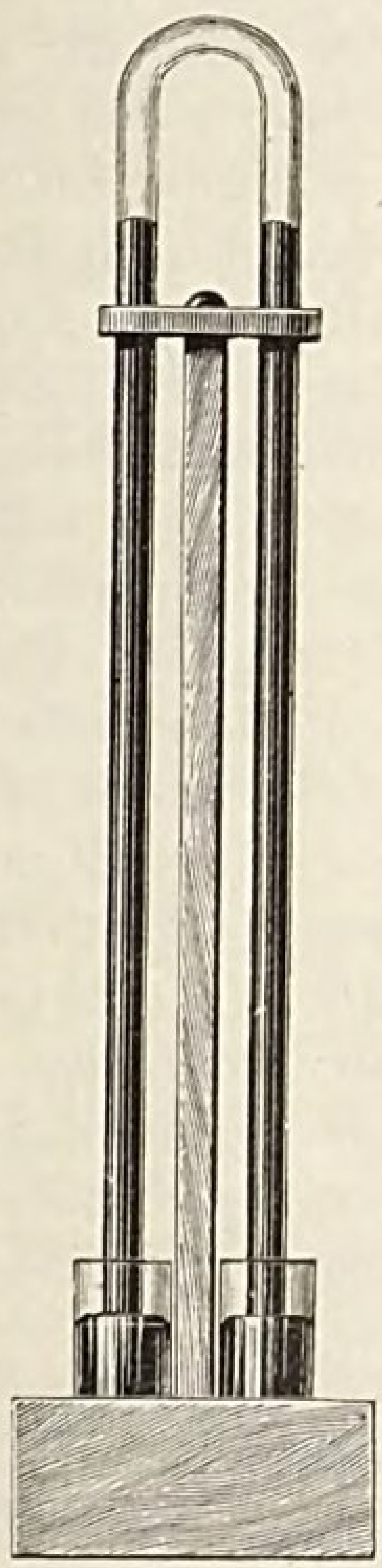


Fig. 241.



Bequemer als ein solches Barometer ist eine von D. Geissler zu diesem Zwecke hergestellte evacuirte und zugeschmolzene Glasröhre, welche etwas Quecksilber enthält. Damit dasselbe beim Schütteln stärkere Reibung im Glase erfahre, und das Leuchten stärker hervortrete, ist im Inneren der Röhre noch eine engere, mit kugelförmigen Erweiterungen versehene Glasröhre von Uranglas angebracht. Beim heftigen Schütteln verbreitet dieselbe ein grünliches Licht, dessen Helligkeit eben hinreicht, um unmittelbar daneben lesen zu können.

Eine Reihe neuer und interessanter Versuche mit elektrischem Licht in sehr stark verdünnten Gasen ist von Hittorf und von Crookes angestellt worden. Da diese Versuche gewöhnlich mittelst des Inductionsstromes eines Ruhmkorff'schen Apparates ausgeführt werden, so wollen wir sie nach Besprechung des letzteren beschreiben.

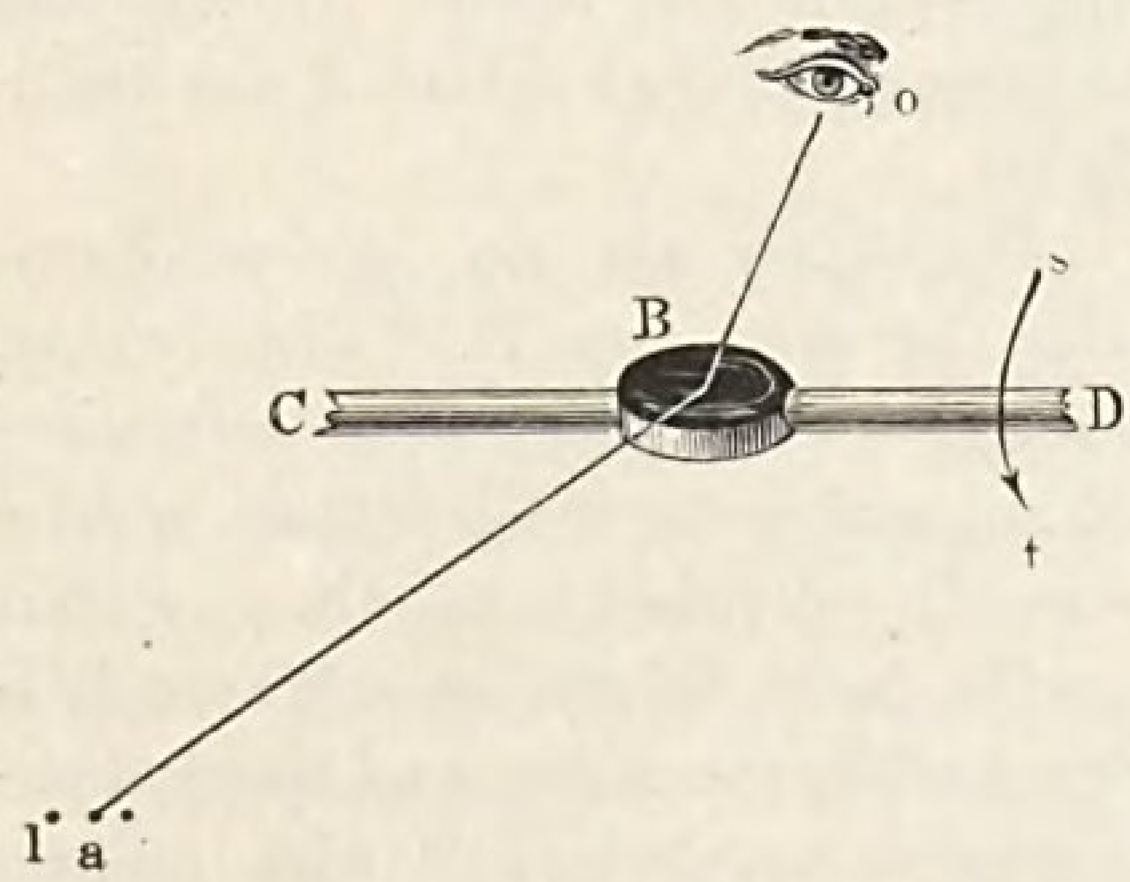
Dauer des elektrischen Funkens, Fortpflanzungs- 87
geschwindigkeit der Elektricität. Wenn ein vom Tages- oder

Lampenlicht beleuchtetes Rad rasch umgedreht wird, so kann man die einzelnen Speichen nicht mehr unterscheiden; wenn aber ein rasch rotirendes Rad in einem dunkeln Zimmer plötzlich durch einen elektrischen Funken erleuchtet wird, so unterscheidet man die einzelnen Speichen so deutlich, als ob das Rad in Ruhe wäre.

Daraus folgt, dass die Dauer des elektrischen Funkens eine sehr kurze ist, um diese Dauer zu ermitteln, hat Wheatstone eine Reihe von Versuchen angestellt.

Es sei *a*, Fig. 242, ein leuchtender Punkt, etwa eine entfernt stehende Kerze, *B* sei ein ebener Metallspiegel, welcher um eine horizontale Axe *C D* drehbar ist, *o* endlich sei das Auge des Beobachters. Wenn der Spiegel ruhig steht, sieht das Auge *o* das Bild des Punktes *a* im Spiegel *B* an einer bestimmten Stelle, die sich aber ändert, wenn der Spiegel gedreht wird; ist die Drehung rasch genug, so erscheint statt des Kerzenbildes ein Lichtstreifen, indem der Lichteindruck von allen den Stellen, welche das Kerzenbild nach und nach durchläuft, noch eine Zeit lang im Auge nachwirkt, und man so den Lichteindruck von den früheren Stellungen des Bildes noch wahrnimmt, während es schon an einer anderen Stelle angekommen ist.

Fig. 242.



Wenn man nun dafür sorgt, dass an der Stelle der Kerze ein elektrischer Funken überspringt, so wird bei genügend rascher Rotation des Spiegels das Bild des Funkens ebenfalls in die Länge gezogen erscheinen, wenn der elektrische Funken auch nur eine ganz geringe Dauer hat.

Der Spiegel war an einem rotirenden Apparate so befestigt, dass er 50 Umdrehungen in einer Secunde machte; um einen Bogen von 1^0 zu durchlaufen, brauchte also der Spiegel $\frac{1}{50 \cdot 360}$ tel, und also, um einen Winkel von $1/2$ Grad zu durchlaufen, $\frac{1}{36\,000}$ tel Secunde. Nun aber ist den Lehren der Optik zufolge die Winkelgeschwindigkeit des Bildes doppelt so gross als die des Spiegels, folglich legt das Bild in $\frac{1}{72\,000}$ tel Secunde einen Bogen von $1/2$ Grad zurück; wenn also die Dauer des elektrischen Funkens auch nur $\frac{1}{72\,000}$ tel Secunde betrüge, so müsste schon sein Bild im rotirenden Spiegel als ein $1/2$ Grad langer Streifen erscheinen.

Nach einander bot nun Wheatstone in einer Entfernung von 3 m dem Spiegel 10 cm lange Funken einer Elektrisirmaschine dar, ferner

Entladungsfunken einer Leydener Flasche, ein 125 cm langes Glasrohr, worin der elektrische Funke längs einer schraubenförmigen Reihe von Scheibchen aus Zinnfolie überspringen musste, ein luftleeres Glasrohr von 2 m Länge, in welchem der Funken beim Durchgang eine ununterbrochene Linie von geschwächtem elektrischen Licht erzeugte etc. Allein in allen diesen Fällen erschienen die reflectirten Bilder, wenn sie innerhalb des Gesichtsfeldes auftraten, vollkommen ungeändert und genau auf eben diese Weise, als ob sie von dem ruhenden Spiegel reflectirt worden wären.

Die Dauer eines solchen elektrischen Funkens betrüge demnach weniger als $\frac{1}{72\,000}$ tel Secunde.

Als aber die Geschwindigkeit des rotirenden Spiegels bis auf 800 Umdrehungen in der Secunde gesteigert wurde, erschien der Funken in der That verlängert, er erschien jedoch noch nicht unter einer Länge von $^1/_2$ Grad, seine Dauer betrug also noch nicht $\frac{1}{1\,152\,000}$ tel Secunde.

Wenn der Ring *c* des luftleer gemachten Apparates, Fig. 240, mit dem Conductor der Elektrisirmaschine in leitende Verbindung gebracht wird, so erblickt man zwischen den Kugeln *a* und *b* einen zusammenhängenden Lichtstrom, wenn *c* in leitender Verbindung mit dem Conductor der gedrehten Elektrisirmaschine steht; untersucht man aber denselben in dem rotirenden Spiegel, so findet man, dass diese Continuität nur scheinbar ist und von einer raschen Folge vorübergehender Blitze herrührt.

Mit Hülfe der Leydener Flasche hat man die Geschwindigkeit zu bestimmen gesucht, mit welcher sich das elektrische Fluidum durch die Leiter verbreitet. Nach Versuchen, welche in England und Frankreich in den Jahren 1745 bis 1750 angestellt wurden, werden isolirte, eine halbe Meile lange Metalldrähte von dem Entladungsschlag momentan durchlaufen. In dieser Zeit stellte man auch Versuche über die Fortpflanzung der Elektricität im Wasser und in feuchtem Boden an. Von einem gegebenen Punkte ausgehend, wurde ein mehrere Hundert Toisen langer Metalldraht, durch Pflöcke von trockenem Holze isolirt, über ein Terrain von sehr abwechselnder Natur und über Flüsse hinweggeleitet und das entfernte Ende in den Boden gesteckt. Am Ausgangspunkte wurde eine geladene Flasche auf den Boden gestellt und mit dem einen Ende des Drahtes der Knopf berührt. Der elektrische Schlag ging durch die ganze Länge des Drahtes hindurch, ging dann in den Boden über, um in demselben zur äusseren Belegung der Flasche zurückzukehren.

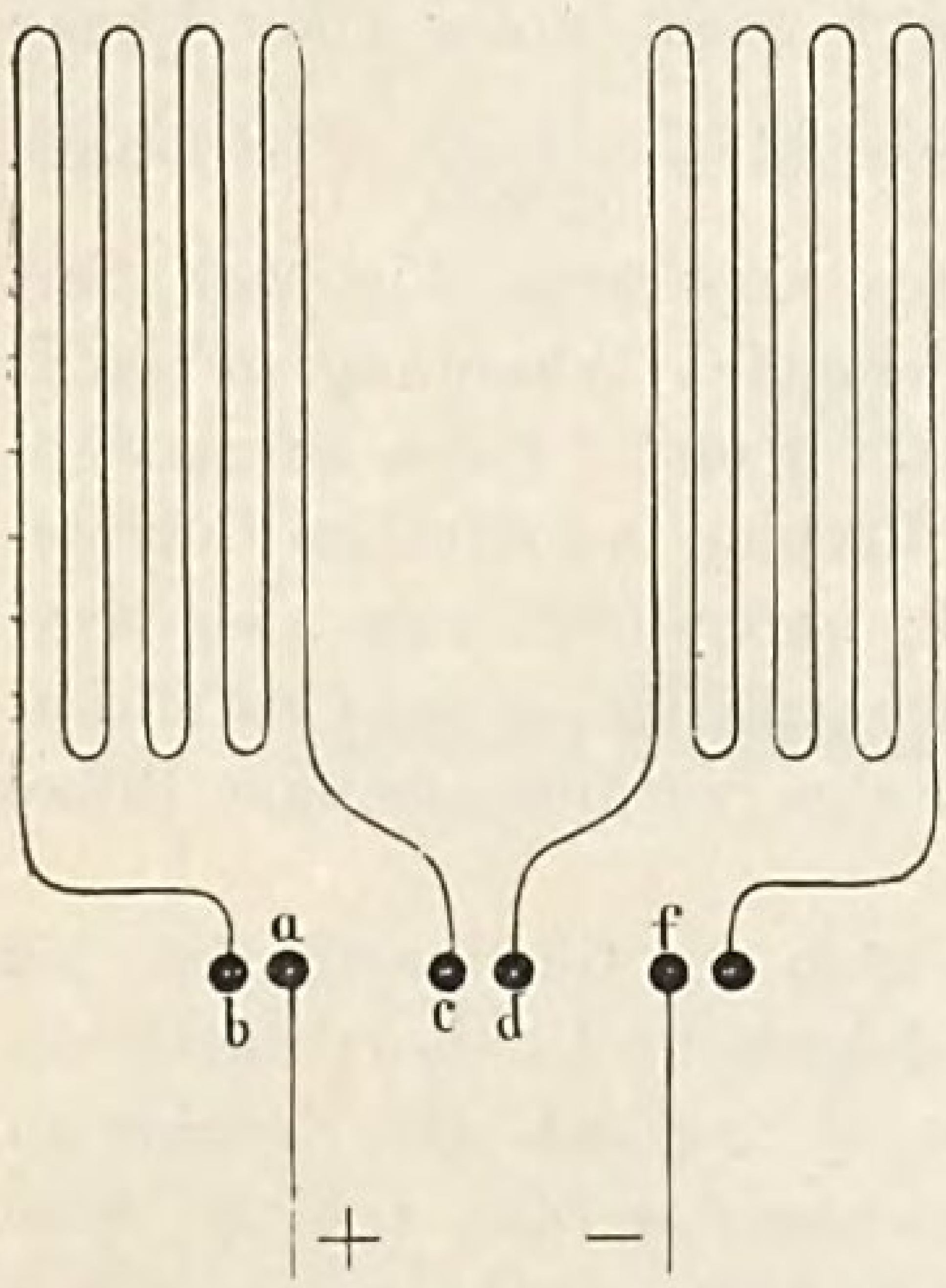
Der Länge des Weges und der mannigfachen Hindernisse ungeachtet erfolgte die Entladung der Flasche ebenso momentan, als ob man einen gewöhnlichen Auslader angewendet hätte.

Genauere Bestimmungen über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Elektricität in sehr langen Leitern hat erst Wheatstone 1835 an-

gestellt; er wandte dazu gleichfalls den rotirenden Spiegel an. Im Uebrigen war seine Vorrichtung im Wesentlichen die folgende.

Auf einem 9 cm im Durchmesser haltenden Brett, dem Funkenbrett, waren sechs Kugeln, *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f* (Fig. 243), gehörig isolirt befestigt. An der Kugel *a* war ein Draht befestigt, welcher mit der inneren Belegung einer Leydener Flasche in Verbindung gebracht werden konnte; die Kugel *b* war von *a* um 2,5 mm entfernt, von *b* aber führte ein Draht in vielen Windungen nach der Kugel *c*. Die Kugel *d* war nun ebenfalls 2,5 mm von *c* entfernt, und von *d* führte ein gleichfalls vielfach gewundener Draht zur Kugel *e*, welche in einer Entfernung von 2,5 mm der Kugel *f* gegenüber stand. Von *f* führte endlich ein Draht zur äusseren Belegung der Flasche. Wenn nun der letzt erwähnte Draht wirklich die äussere Belegung der geladenen Flasche berührt, so muss, wenn man das freie Ende des an *a* befestigten Drahtes der Flaschenkugel nähert, ein Funken zwischen *a* und *b*, ein zweiter zwischen *c* und *d*, ein dritter zwischen *e* und *f* überspringen.

Fig. 243.



Es fragt sich nun, ob diese Funken vollkommen gleichzeitig sind, auch wenn die Länge der Drahtwindungen sehr bedeutend ist? Bei den von Wheatstone angestellten Versuchen betrug die Länge der Drahtwindungen zwischen *b* und *c* $^1/_4$ englische Meile. Ebenso gross war die Länge des Drahtes zwischen *d* und *e*, so dass der Weg, welchen der elektrische Strom von der inneren zu der äusseren Belegung zu durchlaufen hatte, $^1/_2$ englische Meile betrug.

Die sechs Kugeln des Funkenbrettes lagen in einer horizontalen Linie.

3 m vom Funkenbrett entfernt, in gleicher Höhe mit demselben, war nun der Apparat mit dem rotirenden Spiegel *B*, Fig. 242, angebracht. Wäre der Spiegel ruhig stehen geblieben, so würde das Auge *o* die Bilder der drei Funken, welche in *l*, *a* und *r* entstehen, so gesehen haben, wie Fig. 244 zeigt, nämlich als drei in einer Horizontallinie liegende leuchtende Punkte. Als die Rotation des Spiegels so gross war, dass er 800 Umdrehungen in der Secunde machte, erschienen alle drei Lichtpunkte in die Länge gezogen, und ausserdem erschien die mittlere Linie noch gegen die äusseren verrückt, und zwar so, wie Fig. 245 zeigt, wenn der Spiegel in der Richtung des Pfeiles *st* rotirte.

Da die beiden äusseren Funken im Spiegelbilde ihre gegenseitige Lage behalten, so erscheinen also die beiden äusseren Funken vollkommen gleichzeitig; die elektrische Strömung beginnt also gleichzeitig von den

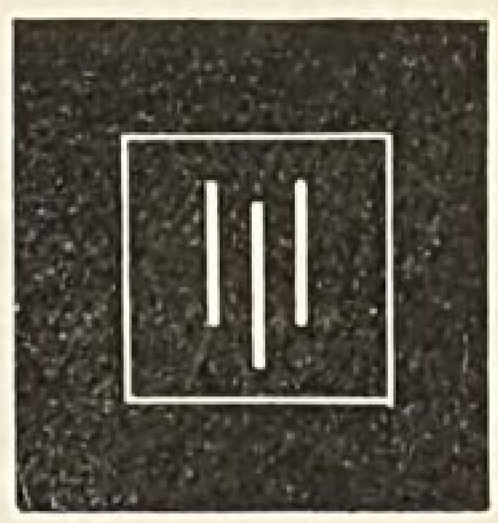
beiden Belegungen gegen die Mitte des Entladungsdrahtes hin, der mittlere Funken erscheint aber später, da sein Bild gegen das der äusseren Funken verrückt erscheint.

Die Verschiebung des mittleren Funkenbildes gegen die äusseren betrug ungefähr $^1/_2$ Grad, der mittlere Funken erschien also ungefähr um $\frac{1}{1152000}$ Secunde später als die beiden äusseren, in dieser Zeit hatte also der elektrische Strom einen Weg von $^1/_4$ einer englischen Meile zurückgelegt, in einer Secunde legt er also einen Weg von $\frac{1152000}{4} = 288000$ englischen Meilen (oder 60000 deutschen Meilen) zurück. Ausser Wheatstone haben auch Fizeau und Gounelle, Walker, Mitchell und Gould, endlich mit besonderer Genauigkeit Werner Siemens Messungen der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Elelektricität ausgeführt. Letzterer fand hierfür in Eisendraht 31000 geographische Meilen oder rund 240000 km per Secunde. Dieser Werth ist viel kleiner als jener Wheatstone's. Kirchhoff hat auf theoretischem Wege die Geschwindigkeit in einer widerstandslosen Leitung auf 41000 geographische

Fig. 244.



Fig. 245.



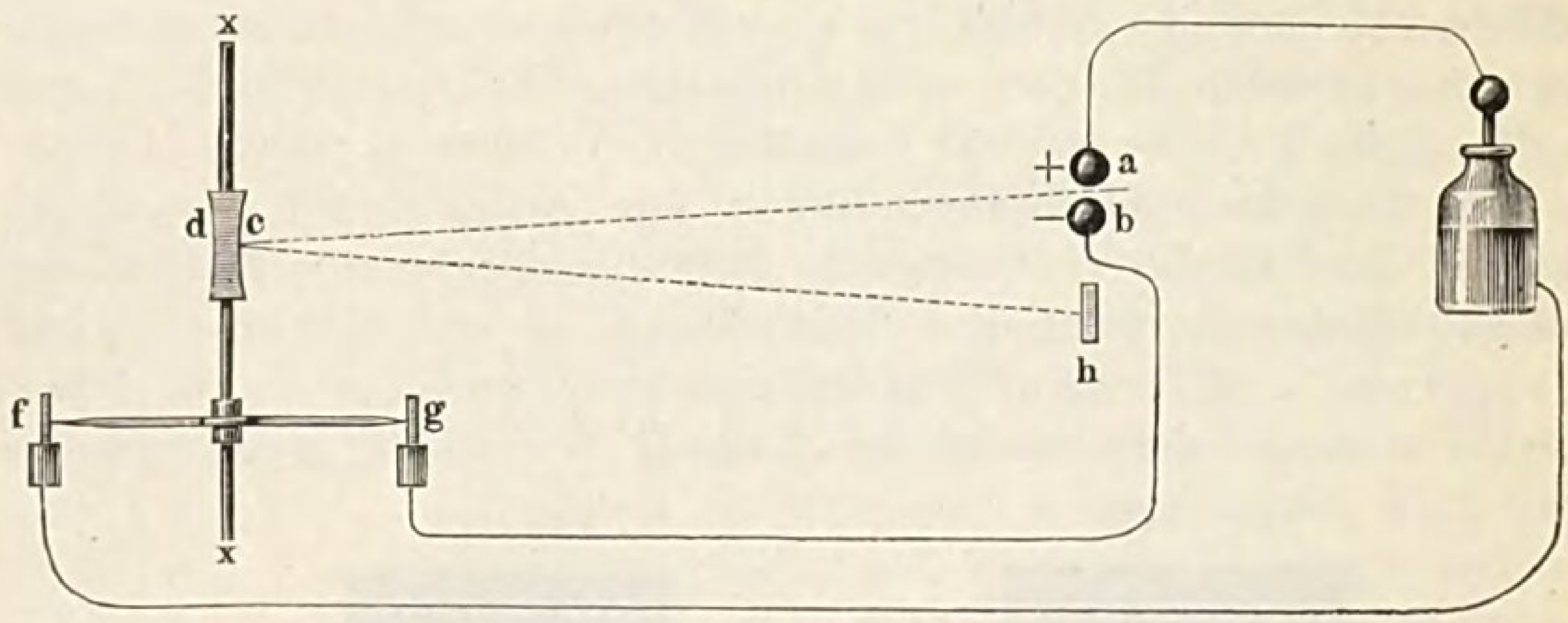
Meilen berechnet, welche demnach als obere Grenze anzusehen ist. Die Elektricität bewegt sich also nahe so schnell wie das Licht. Nach Siemens' Messungen würde sie die Erde in einem Eisendrahte binnen einer Secunde ungefähr sechsmal umkreisen können.

Feddersen's Versuche; oscillatorische, continuirliche und intermittirende Entladungen. Die Untersuchung des Entladungsfunkens der Batterie mittelst rotirender Spiegel hat Feddersen sehr vervollkommnet*). Die Anordnung seiner Versuche ist in Fig. 246 (a. f. S.) schematisch dargestellt. Der Entladungsfunken der Batterie schlägt zwischen den Kugeln *a* und *b* über, welche gehörig isolirt in einem Kästchen enthalten sind, welches nur gegen den rotirenden Spiegel hin eine Oeffnung hat. Auf der durch ein Uhrwerk in sehr gleichmässige Rotation versetzten verticalen Axe *x x* sind zwei Hohlspiegel *c* und *d* so befestigt, dass die Axen derselben in eine gerade Linie zusammenfallen. Der Krümmungshalbmesser dieser Hohlspiegel ist ungefähr 0,5 m. An der Umdrehungsaxe ist ein horizontaler Messingstab befestigt, welcher auf beiden Seiten mit horizontalen 88

*) Pogg. Ann. Bd. CXIII und CXVI.

2 mm breiten Schneiden endigt, und welcher so gestellt ist, dass diese Schneiden gerade in demselben Moment an den isolirten Drahtenden *f* und *g* vorbeistreifen, in welchem die Funkenstelle bei *ab* in der Verticalebene der Spiegelaxe liegt. Das Drahtende *g* ist mit der Kugel *b* leitend verbunden, das Drahtende *f* mit der äusseren Belegung der Leydener Flasche, es findet also eine Entladung gerade in dem Momente statt, in welchem der rotirende Messingstab an den Drahtenden *f* und *g* vorbeistreift. Die Funkenstelle *ab* befindet sich in diesem Augenblick etwas über dem Krümmungsmittelpunkte des vorderen Hohlspiegels, es muss

Fig. 246.



also das Bild desselben etwas unter dem Krümmungsmittelpunkte entstehen, und um dieses Bild zu beobachten, ist bei *h* eine matt geschliffene Glasplatte angebracht, auf welcher man es auffängt.

Als ausser den unentbehrlichen, aus hinlänglich dickem Kupferdrahte gebildeten Leitungsdrähten kein weiterer Widerstand in den Schliessungsbogen eingeschaltet war, erschien bei passender Rotationsgeschwindigkeit der Spiegelaxe (ungefähr 50 Umdrehungen in der Secunde) das Funkenbild zu einem hellen Lichtstreifen, Fig. 247, verlängert, welcher mit einem

Fig. 247.



blendenden Gelbweiss beginnt, alsbald in Grünlichweiss übergeht und meist mit einem rothen Lichtschweif endigt.

Wahrscheinlich ist nur der weissliche lichtstarke Theil des Funkenbandes unmittelbar von dem Funken erzeugt, während der sehr veränderliche kupferrothe Schweif allein von losgerissenen, noch nicht vollständig abgekühlten Metalltheilchen herrührt.

Von der Annahme ausgehend, dass nur der helle Theil des Bildes vom Funken selbst herrührt, kann man die Dauer des Funkens aus der Länge des Funkenbandes berechnen. Für eine Flasche von 0,22 qm Oberfläche, bei $4^1/_2$ mm Schlagweite und 52 Umdrehungen in der Secunde

betrug die Länge des lichtstarken Funkenbandes im Mittel $27\frac{1}{2}$ mm, woraus sich eine Funkendauer von 0,00009 Secunden ergiebt, eine Funkendauer, welche 100 mal grösser ist, als die von Wheatstone bestimmte.

Die Dauer der Entladung wird vergrössert:

1. durch die Vergrösserung der Schlagweite,
2. durch die Vergrösserung der Oberfläche der Batterie, wie dies aus folgender Tabelle hervorgeht:

Zahl der Flaschen	Schlagweite	Dauer des weisslichen Lichtes
1	$1\frac{1}{2}$ mm	0,00004″
	$3\frac{3}{4}$	0,00008
	$6\frac{3}{4}$	0,00010
	10	0,00013
4	$1\frac{1}{2}$	0,0006
	$3\frac{3}{4}$	0,0015

Wenn der Leitungswiderstand des Schliessungsbogens ohne merkliche Verlängerung durch Einschaltung kurzer Stücke schlechtleitender Substanzen, z. B. von Glasröhren, die mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt sind, vermehrt wird, so nimmt die Länge des Funkenbandes, also auch die Entladungsdauer ab.

Wenn dagegen der Leitungswiderstand des Schliessungsbogens durch Einschaltung langer Stücke gut leitender Substanzen vermehrt wird, so nimmt die Länge des Funkenbandes zu.

Als z. B. ein 1300 m langer Kupferdraht eingeschaltet wurde, erschien das Funkenbild auf das Drei- bis Vierfache verlängert, während es bedeutend verkürzt erschien, als statt jenes Kupferdrahtes eine Röhre mit Schwefelsäure eingeschaltet wurde, deren Leitungswiderstand dem des 1300 m langen Kupferdrahtes gleich war.

Das durch Verlängerung des Schliessungsbogens verlängerte Funkenband erscheint nun aber auch nicht mehr als ein zusammenhängender Lichtstreifen, sondern es erscheint in abwechselnd hellen und dunkeln Streifen, also gleichsam in eine Reihe auf einander folgender, durch dunkle Zwischenräume getrennter Funkenbilder zerlegt.

Um diese Unterbrechungen des Funkenbandes besser studiren zu können, photographirte Feddersen dasselbe, indem er eine photographisch präparirte Platte an die Stelle der matten Glastafel *h*, Fig. 246, setzte. Fig. 248 und 249 stellen zwei solcher photographirter Funkenbilder dar.

Der Funken, welcher zwischen Kupferkugeln bei gut leitendem kürzerem Schliessungsbogen überschlug, lieferte bei 87 Spiegelrotationen in der Secunde das Funkenbild Fig. 248, während Fig. 249 das Bild eines Funkens ist, welcher bei längerem gut leitendem Schliessungsbogen zwischen Zinnkugeln überschlug.

Bei Fig. 248 zeigt sich die Unterbrechung des Lichtbandes nur an den Rändern, hier aber ist ein regelmässiges Alterniren der Lichtintensität wahrnehmbar. Dieses Alterniren deutet nach Feddersen auf ein Hin- und Herströmen der Elektricität, für welches auch beim Fehlen des Alternirens die stets gleiche Breite der einzelnen Lichtstreifen, wie in Fig. 249, spricht.

Feddersen unterscheidet demnach drei wesentlich verschiedene Arten der Entladung, nämlich:

1. Die oscillatorische Entladung bei geringem Widerstande, aus mehreren Einzelentladungen zusammengesetzt, bei welchen die

Fig. 248.

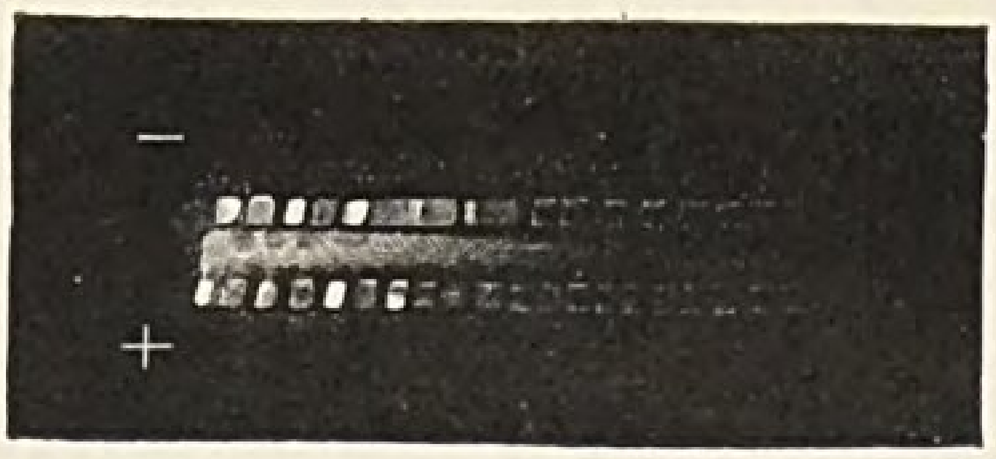
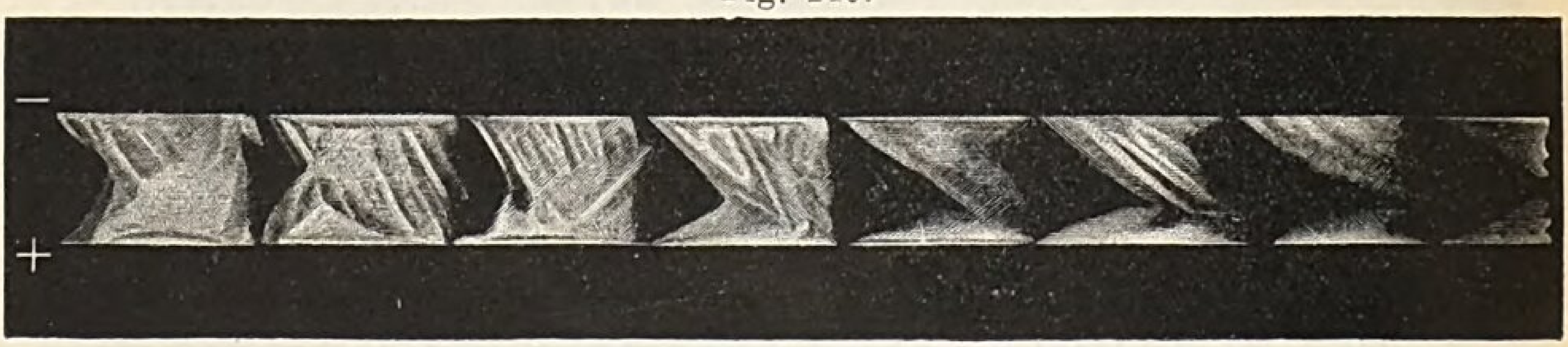


Fig. 249.



Stromrichtung wechselt. Das Funkenbild erscheint verlängert und alternirend gestreift.

2. Die continuirliche Entladung bei grösserem Widerstande, aus einer einzigen Entladung bestehend. Das Funkenbild erscheint verkürzt, aus einem einzigen Lichtstreifen gebildet.

3. Die intermittirende Entladung bei grösstem Widerstande, aus einzelnen unregelmässig auf einander folgenden Funken bestehend. Dieselben entsprechen den Partialentladungen der Batterie. Jedes der Funkenbilder kann die unter 1. erwähnten Streifen zeigen.

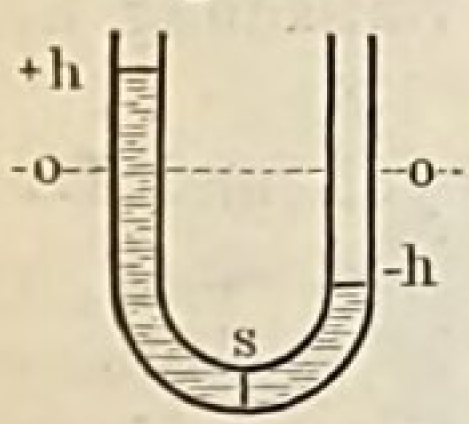
Die oscillatorische Entladung einer Leydener Flasche lässt sich als eine analoge Erscheinung auffassen, wie die oscillatorische Bewegung einer Flüssigkeit in communicirenden Gefässen. Wenn man z. B. das U-förmige Gefäss, Fig. 250, bei s mit einem Schieber verschliesst, dann einerseits bis zur Höhe $+h$, andererseits bis zur geringeren Höhe $-h$

mit Wasser füllt, so hängt die Bewegungsweise des Wassers beim Oeffnen des Schiebers *s* vom Widerstande ab, den die Flüssigkeit vorfindet.

Oeffnet man den Schieber plötzlich weit, so sinkt und steigt das Wasser nicht bloss bis zum horizontalen Stande *o o*, sondern es geht vermöge des Beharrungsvermögens über dieses Ziel hinaus und kommt erst nach mehreren Oscillationen, bei welchen die Stromrichtung in der Schieberöffnung alternirt, zur Ruhe. Schliesst man den Schieber während der Oscillationen, so kann es zufällig kommen, dass das Wasser in jenem Theil höher steht, wo es früher tiefer stand. Oeffnet man aber den Schieber *s* nur wenig, so dass das Wasser grösseren Widerstand findet, so bleiben die Oscillationen aus, die „Entladung" ist continuirlich und es tritt keine Aenderung der Stromrichtung ein.

Diese Erscheinung der oscillatorischen Entladung ist nun offenbar im Zusammenhange mit der Thatsache, dass nach Entladung einer Leydener Flasche mit gutem Leiter oft umgekehrte Entladungsrückstände angetroffen werden. Auch die im nächsten Paragraphen zu besprechenden anomalen Magnetisirungen sind dadurch zu erklären. Eine Bestätigung dieser Erklärung wird auch durch die später zu besprechenden Versuche von Paalzow über die Entladung von Leydener Flaschen durch Geissler'sche Röhren beigebracht.

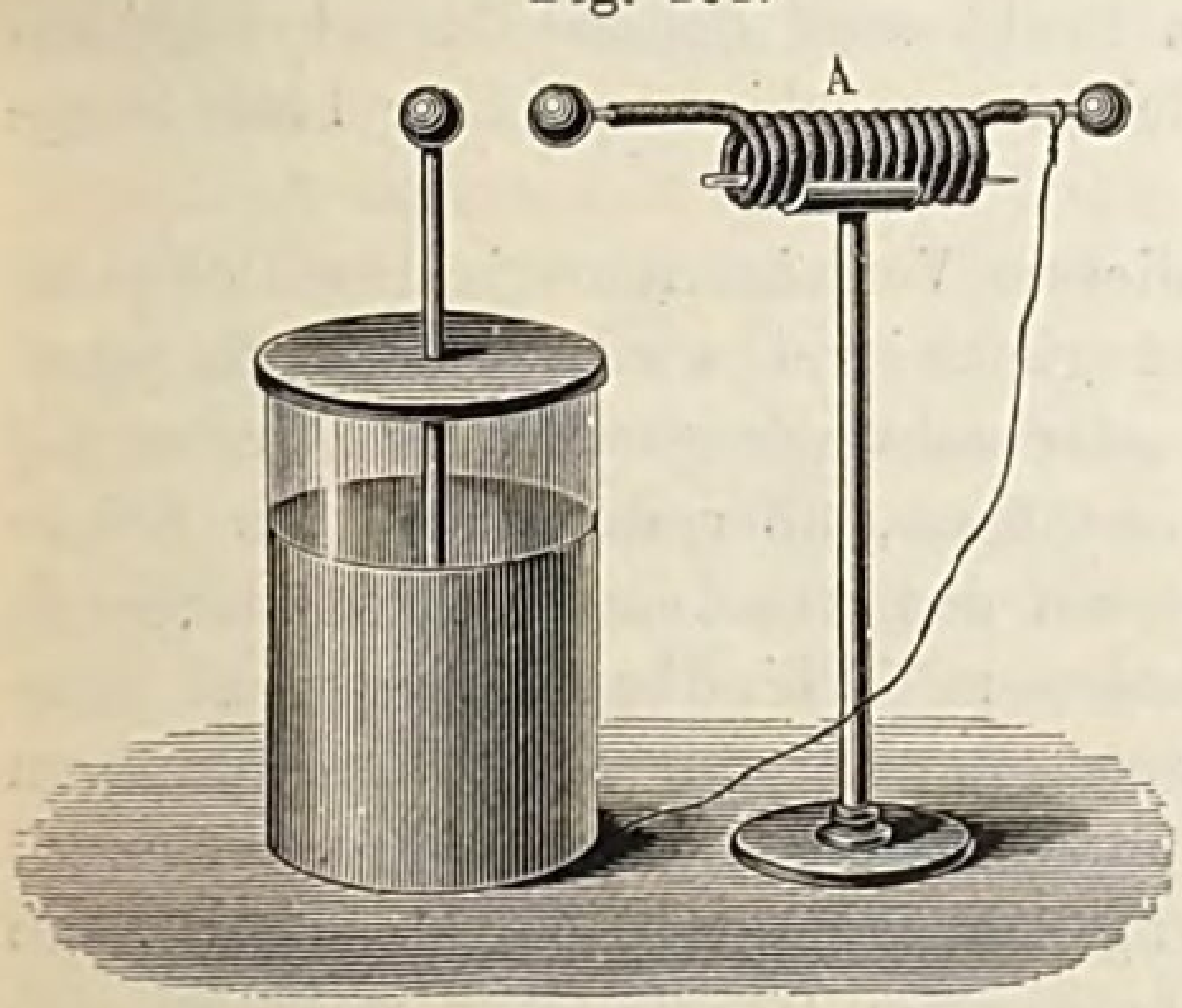
Fig. 250.



Wenn wir sagen, die Elektricität bewege sich wie eine flüssige Masse, welche Beharrungsvermögen hat, so wollen wir damit nicht aussprechen, dass sie wirklich eine ponderable, mit Beharrungsvermögen ausgestattete Masse sei, da noch andere Erklärungen dieses Verhaltens möglich sind.

Magnetische Wirkungen der Entladung. Entladet man eine Leydener Flasche durch einen spiralförmig gewundenen Draht, dessen einzelne Windungen hinlänglich von einander isolirt sind, so wird eine in die Spirale eingelegte Stahlnadel bleibend magnetisch. Die Ausführung des Versuches ist aus Fig. 251 zu ersehen. Bezüglich der Anordnung der Pole bemerkt man das unerwartete Resultat, dass bei gleicher Ladung der Flasche der Nordpol bald an dem einen, bald an dem anderen Ende der Stahlnadel auftritt. Es erklärt sich dieses Verhalten jedoch leicht, wenn man den Rückstand der Flasche untersucht, welcher eben- 89

Fig. 251.



falls in unregelmässiger Weise das Zeichen wechselt. Da nämlich, wie wir im §. 88 erfahren haben, der Entladungsfunken aus vielen einzelnen alternirenden Entladungen zusammengesetzt ist, so wird die Stahlnadel diejenige Anordnung der Pole erhalten, welche der letzten Partialentladung zukommt. Es stimmt dann diese Anordnung ganz mit der Ampère'schen Regel überein, welche wir für die Einwirkung eines constanten elektrischen Stromes kennen lernen werden. Dasselbe gilt für die Ablenkung magnetischer beweglicher Nadeln durch den Entladungsschlag. Das Magnetischwerden stählerner Geräthe durch Blitzschlag gehört ebenfalls zu dieser Gruppe von Erscheinungen.

90 **Chemische Wirkungen der Entladung.** Die chemischen Wirkungen der sich entladenden Elektricität bestehen insbesondere darin, dass manche Leiter zersetzt werden. Da jedoch die thermischen Wirkungen der Entladung nebenhergehen, so ist nicht immer zu entscheiden, ob die Zersetzung direct die Folge der Elektricität oder zunächst nur die Folge der hohen Temperatur ist, welche durch die Entladung herbeigeführt wird.

Schon im Jahre 1789 brachten Päts van Troastwyck und Drimann dadurch eine Wasserzersetzung hervor, dass sie in einer mit Wasser gefüllten Röhre zwischen zwei Golddrähten die Entladungsschläge einer Leydener Flasche übergehen liessen. Wollaston beförderte die Wasserzersetzung der Reibungselektricität dadurch, dass er die Berührung der Poldrähte mit dem Wasser möglichst beschränkte, was er dadurch bewerkstelligte, dass er feine Golddrähte (gegenwärtig wendet man statt dessen Platindrähte an) in Haarröhrchen von Glas einschmolz und das auf der einen Seite hervorragende Drahtstück bis auf das Glas wegfeilte, so dass in Wasser eingetaucht der Draht nur noch mit seinem Querschnitte mit dem Wasser in Berührung stand.

Stellt man zwei solcher Wollaston'scher Spitzen, Fig. 252, in Wasser einander gegenüber, so erhält man an jeder derselben eine Gasentwickelung, wenn man den einen Draht zum Boden ableitet und auf den anderen vom Conductor der Elektrisirmaschine ungefähr 1 mm lange Fünkchen überschlagen lässt.

Wollaston fand, dass bei diesem Verfahren an jeder Polspitze Sauerstoffgas und Wasserstoffgas zugleich frei wird. Buff dagegen erhielt aus luftfreiem destillirtem oder schwach gesäuertem Wasser an der positiven Polspitze reines Sauerstoffgas, über der negativen reines Wasserstoffgas, als der eine Draht mit dem Conductor, der andere mit dem Reibzeuge einer Elektrisirmaschine in Verbindung gesetzt und diese umgedreht wurde; und zwar erhielt er während eines dreistündigen Drehens 42,5 cmm Wasserstoffgas und 14,5 cmm Sauerstoffgas. Ersetzt man das Wasser durch eine Lösung von Kupfervitriol, so erhält man nur am positiven Pole eine Entwickelung von Gasbläschen, während sich am negativen Pole Kupfer absetzt.

Wenn man auf eine Glasplatte ein Stückchen Papier legt, welches mit einer Lösung von Glaubersalz getränkt ist, und dessen eine Hälfte mit Curcumatinctur gelb, dessen andere Hälfte aber durch Lackmustinctur blau gefärbt ist, wenn man alsdann auf die Lackmushälfte einen Draht aufsetzt, welcher mit dem positiven Conductor der Elektrisirmaschine in Verbindung steht, während ein die andere Hälfte des Papiers berührender Draht zum Boden abgeleitet ist, Fig. 253, so entsteht um den positiven Poldraht herum ein rother, um den negativen ein brauner Fleck, sobald die Maschine einige Zeit lang gedreht wird.

Faraday änderte diesen Versuch auch dahin ab, dass er ein auf ähnliche Weise präparirtes Stückchen Papier, von einem Glasstreifen getragen, so zwischen zwei Platinspitzen brachte, dass das Papier nicht in unmittelbarer Berührung mit den Spitzen stand, Fig. 254; die dem Lackmusende zugekehrte Spitze wurde mit dem positiven Conductor der Maschine in Verbindung gesetzt, die andere zum Boden abgeleitet. Die

Fig. 252.

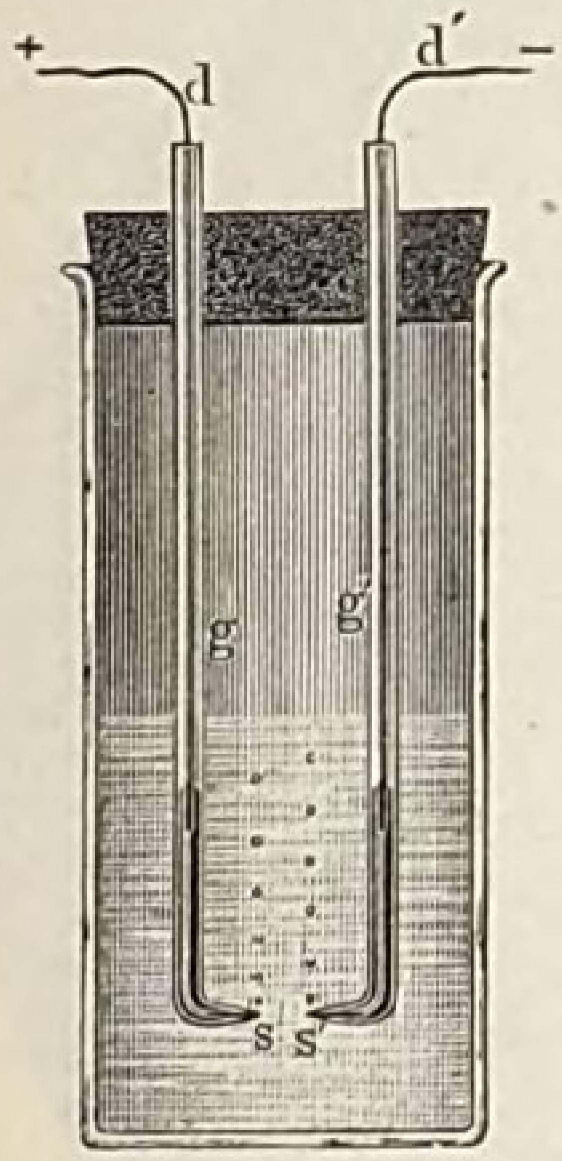


Fig. 253.

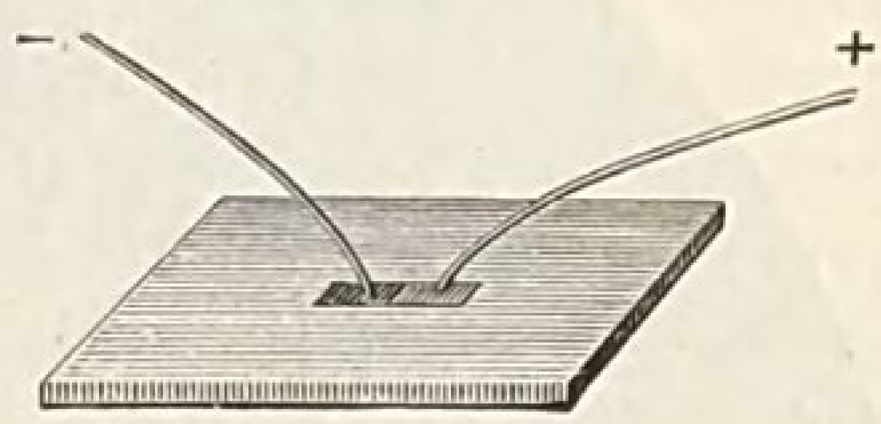
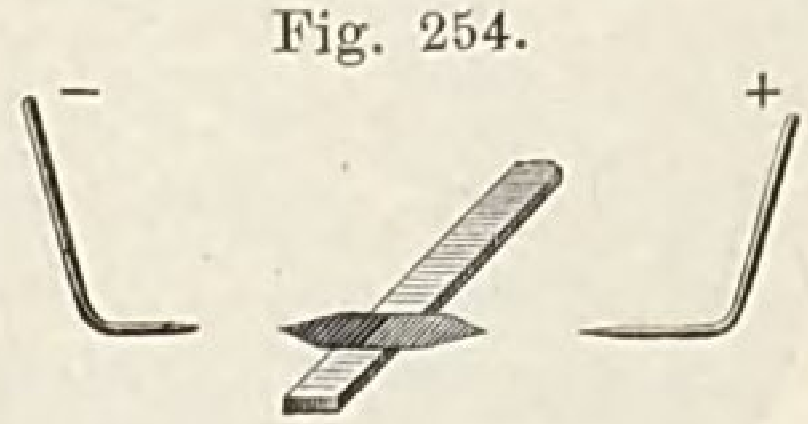


Fig. 254.



durch die Drehung der Maschine bewirkte Zersetzung des Salzes wurde alsbald, wie im vorigen Versuche, durch eine Farbenänderung merklich gemacht.

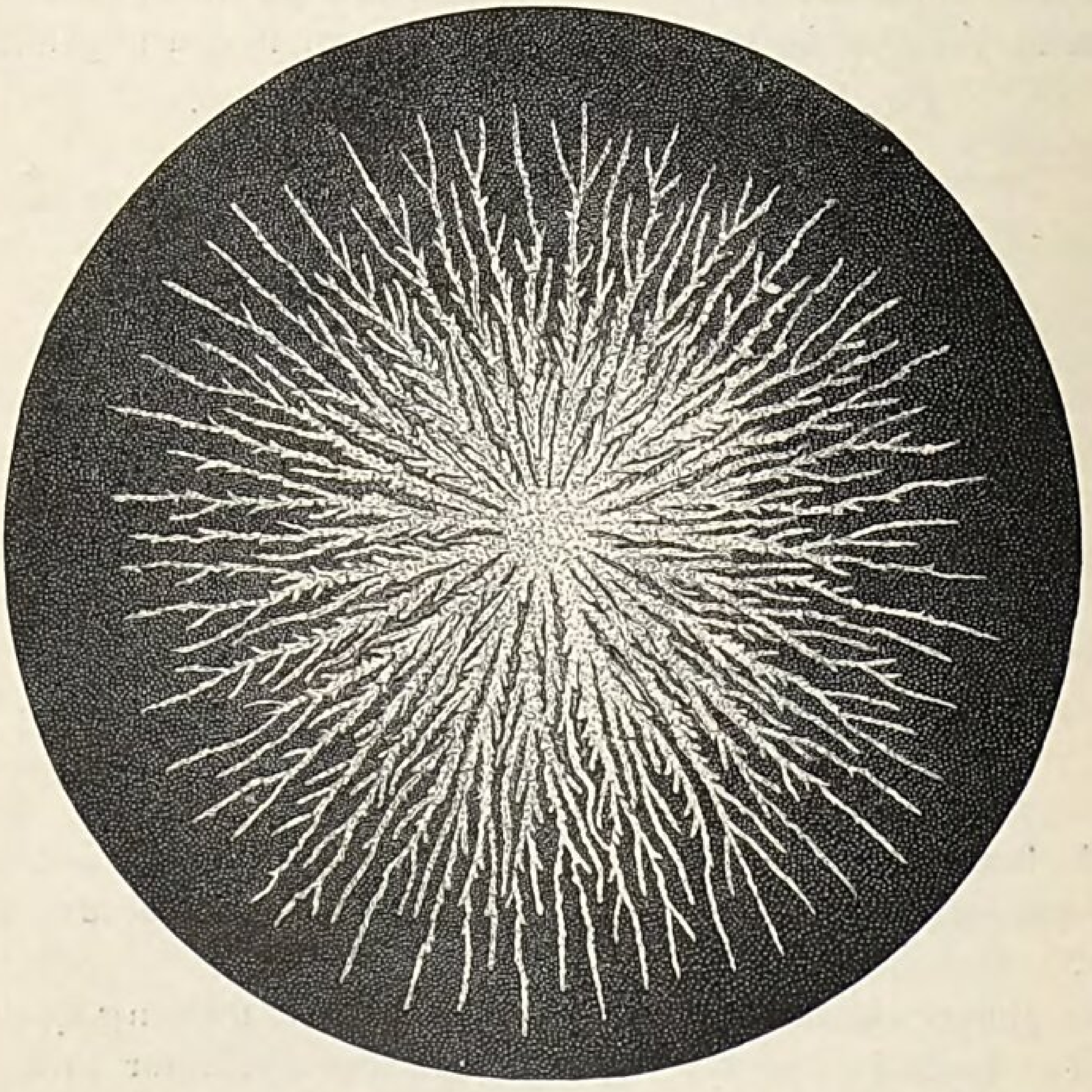
Eine andere chemische Wirkung ist die Umwandlung des Sauerstoffs der Luft in Ozon. Nach Ansicht der Chemiker wird der aus zwei Atomen bestehende gewöhnliche Sauerstoff O_2 gespalten und die Bestandtheile treten mit unzersetzten Sauerstoffmolecülen zu Ozon von der Zusammensetzung O_3 zusammen. Ozon ist demnach eine polymere Modification des Sauerstoffs, welche sich durch eigenthümlichen Geruch und energisch oxydirende Eigenschaften auszeichnet. Dieser Körper entsteht stets in geringer Menge, wenn Elektricität durch Spitzen in die Luft ausströmt. Der Geruch erinnert an Phosphor, weil ebenfalls Ozon entsteht, wenn feuchter Phosphor mit Luft in Berührung ist. Man kann die Gegenwart des Ozons nachweisen, indem man dasselbe auf Papierstreifen wirken lässt, die mit Stärkekleister und Jodkalium bestrichen

sind. Das durch Ozon in Freiheit gesetzte Jod färbt den Kleister intensiv blau.

Die chemischen Wirkungen der Entladung einer Leydener Flasche oder des Funkenstromes einer Influenzmaschine sind der Quantität nach nur sehr gering gegenüber der chemischen Wirkung des später zu besprechenden galvanischen Stromes.

91 **Die Lichtenberg'schen Figuren.** Wenn man den Knopf einer mit positiver Elektricität geladenen Leydener Flasche mit einer Scheibe von Pech oder Schellack berührt, und alsdann *semen lycopodii*, gepulvertes Colophonium, Schwefelblumen oder Mennige aus einem leinenen Beutelchen auf diese Scheibe siebt, so entsteht eine Staubfigur, welche durch

Fig. 255



denditrisch sich verästelnde Strahlen gebildet wird, die von dem berührten Punkte ausgehen.

Fig. 255 zeigt eine genaue Abbildung einer besonders schön gelungenen Staubfigur dieser Art, welche von Brestrich in Berlin erhalten worden ist.

War dagegen die innere Belegung der Leydener Flasche mit negativer Elektricität geladen, so bildet sich diese Strahlenfigur nicht, es entstehen nur rundliche Flecken, deren Ausdehnung bei weitem geringer ist als die der positiven Strahlenfigur. Die negative Staubfigur zeigt sich am schönsten bei Anwendung von *semen lycopodii* oder Mennige.

Lichtenberg, welcher der Entdecker dieser Staubfiguren ist, setzte, um dieselben zu erhalten, ein kleines Metallrohr auf die Harzplatte und liess auf dieses den elektrischen Funken schlagen. Fig. 256 stellt die auf diese Weise erhaltene positive Staubfigur dar.

Das Sichtbarwerden dieser Figuren rührt ohne Zweifel daher, dass das Pulver durch die Reibung an den Oeffnungen der Leinwand elektrisch wird und sich auf diejenigen Stellen der Harztafel aufsetzt, welche die entgegengesetzte Elektricität haben.

Benützt man ein Gemisch aus Lycopodium und Zinnober oder von Mennige und Schwefelblumen, so werden durch Reiben Lycopodium beziehungsweise Mennige positiv, Zinnober beziehungsweise Schwefel negativ elektrisch. Erstere Substanzen setzen sich dann an den negativ elektrischen Stellen, letztere an den positiv elektrischen an. Da auf der Harzplatte meist durch Influenz entgegengesetzte elektrische Zustände hervorgerufen werden, so erhält man auf diese Weise doppeltfarbige Zeichnungen.

Fig. 256.



Man sah früher die Unterschiede der positiven und der negativen Staubfigur für einen charakteristischen Unterschied der beiden Elektricitäten an; dagegen aber spricht der Umstand, dass dieser Unterschied ganz verschwindet, wenn die Harzplatte sich während des Ueberganges der Elektricität unter dem ausgepumpten Recipienten der Luftpumpe befindet. In diesem Falle bilden sich nur kleine rundliche Flecken.

Riess*) erklärt die Bildung dieser Staubfiguren im Wesentlichen folgendermaassen: „Die vom Knopfe der Leydener Flasche ausgehende Elektricität wird zunächst die auf der Oberfläche der Harzscheibe condensirte Atmosphäre von Luft und Wasserdampf zerreissen und über die Harzfläche hintreiben, welche, wie Faraday gezeigt hat, durch Reibung mit Wasserdampf negativ elektrisch wird. Ist nun die Flasche, von deren Knopfe die Wirkung ausgeht, mit positiver Elektricität geladen, so wird sich dieselbe über die gleichsam negativ präparirte Fläche weithin dendritisch verbreiten können, während eine gleiche Ausbreitung der negativen Elektricität auf der negativen Oberfläche nicht möglich ist.“

Auf denselben Erklärungsgrund hat man auch den in §. 82 besprochenen Lullin'schen Versuch zurückzuführen versucht. Dass damit noch nicht Alles aufgeklärt ist, geht aus den diesbezüglichen Untersuchungen von A. v. Waltenhofen**), E. Reitlinger***), W. v. Bezold†) hervor, auf welche wir hiermit verweisen.

*) Lehre von der Reibungselektricität, 2. Bd., S. 212.

**) Wien. Akad. Ber. 1866, Bd. 53.

***) Wien. Akad. Ber. Bd. 41, 46, 51, 53

†) München. Akad. Ber. 1869 und 1870.

92 **Die elektrische Spannung als Form der Energie.** In der Wärmelehre haben wir in dem Schema über die verschiedenen Formen der Energie auch die elektrische Spannung als potentielle Energie aufgeführt.

Wenn wir die Reibungselektrisirmaschine drehen, so übertragen wir auf dieselbe ein gewisses Arbeitsquantum, also ein gewisses Quantum actueller Energie. Dasselbe wird zum Theil in Wärme, zum Theil in elektrische Energie umgewandelt. Doch dürfte es schwierig sein, in diesem Falle durch Messung die Umwandlung zu verfolgen und nachzuweisen, dass die erzeugte Wärme allein nicht das volle Aequivalent der aufgewendeten Arbeit ist. Sehr leicht ist dagegen dieser Nachweis an der Influenzmaschine zu führen, da bei derselben die Reibung sehr gering ist. Dreht man eine nicht geladene Influenzmaschine mit constanter Geschwindigkeit und nähert sodann die vorher geriebene Hartgummiplatte dem Papierbelege, so fühlt man sehr deutlich in demselben Moment, in welchem sich das Eintreten der Wirksamkeit der Maschine durch das Sausegeräusch ankündigt, eine auffallende Vermehrung des Widerstandes und man ist genöthigt, um die frühere Drehungsgeschwindigkeit beizubehalten, mehr Kraft aufzuwenden. Umgekehrt beobachtet man sehr deutlich, dass die Maschine in dem Momente, wo sie durch genügende Entfernung der Elektrodenkugeln sich entladet und aufhört Elektricität zu entwickeln, schneller zu laufen beginnt, dass also der bis dahin in elektrische Energie umgewandelte Arbeitsaufwand nunmehr zur Steigerung der lebendigen Kraft der rotirenden Scheibe verfügbar geworden ist.

Dieser Versuch ist auch quantitativ angestellt worden von dem seither verstorbenen Professor Rosetti und in anderer Form von E. Mach. Der Erstere setzte eine Influenzmaschine, abwechselnd in geladenem und in ungeladenem Zustande in Gang durch den Zug eines Gewichtes. Er konnte so einmal die auf Reibung und elektrische Energie aufgewendete Arbeit, dann die auf die Reibung allein entfallende Arbeit bestimmen und durch Abzug der letzteren die auf elektrische Energie allein aufgewandte mechanische Energie bestimmen. E. Mach eliminirte die Reibungsarbeit gänzlich. Er hängte die feste Scheibe der Influenzmaschine in horizontaler Lage mittelst dreier Verticalfäden von der Länge l und dem Axenabstande r beweglich auf. Wird nun die Maschine erregt und gedreht, so erhält auch die sonst feste Scheibe eine Drehung um ihre Axe, da sie in Folge der Anziehung der rotirenden Scheibe mitgenommen wird. Da aber in Folge der trifilaren Aufhängung eine rückwirkende Kraft auftritt, welche die Scheibe in die frühere Lage zurückzutreiben sucht, so muss bei einer bestimmten Ablenkung ein Gleichgewicht eintreten. Ist P das Scheibengewicht, α der (mit Spiegel und Scala gemessene) Ablenkungswinkel, so ist das Drehungsmoment der trifilaren Aufhängung $D = \frac{P r^2}{l} \alpha$, die bei n Umdrehun-

gen aufgewendete Arbeit $A = 2 n \pi D$*). Das Verfahren hat viele Aehnlichkeit mit der Arbeitsmessung mittelst des Prony'schen Zaumes.

Wenn während eines solchen Versuches die Maschinenconductoren durch einen Leiter verbunden sind, so entsteht ein elektrischer Strom, dessen Intensität mittelst seiner Einwirkung auf eine Magnetnadel gemessen werden kann. Dabei wird zuletzt, falls keine andere Wirkung eingeleitet wird, die ganze Energie in Wärme verwandelt. Wird während der Drehung der Maschine eine Leydener Flasche geladen, so wird die aufgewendete Energie als potentielle Energie der Flaschenladung aufgespeichert. Beim Entladen der Flasche wird sie wieder grösstentheils in Wärme verwandelt, zum kleineren Theil zu mechanischen Effecten (Knall etc.) verwendet.

Wenn man daher eine und dieselbe Flasche mehrmals ganz gleich stark ladet, so müssen jedesmal die bei der Entladung auftretenden Wirkungen äquivalent sein. Würde man also jedesmal alle auftretenden Energieformen auf ein und dieselbe, z. B. auf Wärme, umrechnen, so müsste stets dasselbe Wärmequantum resultiren, welches wir daher als Aequivalent der verlorenen Ladung betrachten müssen.

Entladen wir nun die Flasche einmal mit einem kurzen, das andere Mal mit einem langen Drahtbogen, so ist die Wärmeentwickelung des Drahtes im Ganzen im zweiten Falle grösser, dafür ist aber auch der Funken schwächer und weniger glänzend, die Luft wird also weniger heftig erschüttert und weniger hoch erhitzt. Schaltet man in die Funkenstrecke ein Kartenblatt ein, welches der Funken durchbohren muss, so braucht er dazu mehr Arbeit, desto weniger Wärme kann er dann im übrigen Leiter entwickeln. Diese Thatsachen sind von Riess mittelst des oben beschriebenen Luftthermometers nachgewiesen worden. So erhielt Riess z. B. folgende Depressionen des Luftthermometers, wenn der Funken durchzuschlagen hatte:

durch Luft allein:	Depression	= 15,9
durch ein Kartenblatt:	„	= 11,7
durch zwei Kartenblätter:	„	= 8,0
durch ein Glimmerblatt:	„	= 6,8

Man sieht also deutlich, dass der Mehraufwand von Energie in der Funkenstrecke von einer Minderentwickelung an Wärme im Drahte begleitet ist, wie es das Aequivalenzgesetz erfordert.

Eine Umwandlung der elektrischen Energie in mechanische Energie findet beim Kugeltanz, Glockenspiel, Flugrad und dergleichen Spielereien statt. Ein recht instructives hierher gehöriges Experiment, die Ingangsetzung einer zweiten Influenzmaschine durch eine erste, deren Conductoren entsprechend mit der zweiten verbunden sind, haben wir bereits

*) Eine Correction ist noch erforderlich wegen der elektrischen Anziehung der Scheiben, welche scheinbar ihr Gewicht ändert. Man erhält dieselbe durch Beobachtung einer zweiten Ablenkung bei vermehrtem Scheibengewichte.

im §. 62 angeführt. Da der elektrische Strom unterwegs Energie in Form von Wärme abgiebt, so kann die zweite Maschine nicht ebenso viel Arbeit leisten, als die erste aufnimmt.

Es steht also fest, dass gespannte Elektricität eine Form der Energie ist, da sie aus anderen Energieformen entstehen und wieder in solche verwandelt werden kann. Es fragt sich nun, ob wir sagen können, dass Elektricitätsmengen und Wärmemengen äquivalent seien, so wie etwa Arbeitsquantitäten und Wärmemengen äquivalent sind. Können wir analog der Wärmeeinheit oder Calorie eine Einheit der Elektricitätsmenge oder Elektrie bilden, welche zu der Calorie in einem analogen Aequivalentverhältnisse steht, wie die Arbeitseinheit zur Calorie?

Eine nähere Ueberlegung ergiebt, dass dies nicht möglich ist. Es ist ja nicht die Elektricitätsmenge selbst, welche in Wärme oder Arbeit verwandelt wird, sondern die Energie der elektrischen Spannung oder des elektrischen Stromes.

Zwischen Elektricitätsmenge und Wärmemenge eine Aequivalenz aufzusuchen, wäre ebenso irrthümlich, als wenn man zwischen Masse und Wärmemenge eine Aequivalenz aufstellen wollte. Eine Masse befindet sich einer anderen Masse, z. B. der Erde, gegenüber in analoger Lage, wie zwei entgegengesetzt elektrische Körper. Sie ziehen sich gegenseitig an und zwar auch mit einer Kraft, die mit dem Quadrat der Distanz abnimmt. Ein Kilogramm enthält als Masse für sich noch keine Energie, sondern nur, indem es von der Masse der Erde einen Abstand besitzt, der verringert werden kann.

Ebenso enthält eine Elektricitätsmenge an sich keine Energie, wohl aber, indem ihre Theile sich gegenseitig abstossen oder ihr eine andere Elektricitätsmenge gegenüber steht, von der sie angezogen oder abgestossen wird. Es ist daher eine sehr unrichtige, abgekürzte Ausdrucksweise, wenn man sagt, „Elektricität" werde in Arbeit oder in Wärme verwandelt, oder sei eine diesen letzteren äquivalente Grösse.

93 **Atmosphärische Elektricität, absolutes Potential der Erde** *). Als Wall im Jahre 1698 zum ersten Male an einem grossen geriebenen Harzcylinder einen etwas lebhaften Funken und ein stärkeres Geräusch wahrnahm, sprach er alsbald die Idee aus, dass dieser Funken und dieses Knacken den Blitz und den Donner darzustellen schienen. Den Beweis für die Richtigkeit dieser Analogie hat aber erst Franklin geliefert, welcher vorher schon mehrere elektrische Entdeckungen, besonders über die Leydener Flasche und das Verhalten der Spitzen gemacht hatte. Er kam auf den glücklichen Gedanken, die Elektricität in den Gewitterwolken selbst aufzusuchen; er schloss nämlich, das Metallspitzen, auf hohen Gebäuden aufgestellt, die Elektricität der Wolken aufsaugen müssten. Da sich in Philadelphia damals kein für seine

*) Wir folgen in diesem Paragraphen im Wesentlichen der Darstellung von Fr. Exner, Wien. Akad. Ber. 1886, Bd. XCIII, S. 230.

Zwecke passender Thurm befand, so machte Franklin seine ersten Versuche mit einem Drachen, den er steigen liess, als sich Wolken am Himmel zeigten, von denen sich elektrische Effecte hoffen liessen. Anfangs zogen mehrere Wolken wirkungslos vorüber, endlich fingen die Fasern der Schnur an, sich aufzustellen, und es liess sich ein Geräusch hören. Dadurch ermuthigt, hielt Franklin den Finger gegen das Ende der Schnur, und siehe da, ein Funken sprang über, dem bald noch mehrere andere folgten.

Franklin hat seinen Versuch im Jahre 1752 angestellt, er wurde überall mit demselben Erfolge wiederholt. De Romas zu Nerac war, durch den ersten Gedanken Franklin's geleitet, ebenfalls auf die Idee gekommen, einen Drachen statt der hochgestellten Spitzen anzuwenden. Ohne von Franklin's Resultaten Kunde zu haben, erhielt er im Juni 1753 sehr kräftige Zeichen von Elektricität, weil er die glückliche Idee hatte, in der Schnur ihrer ganzen Länge nach einen feinen Metalldraht anzubringen. Im Jahre 1757 wiederholte de Romas seine Versuche und erhielt Funken von überraschender Grösse.

Diese Versuche beweisen also, dass der Blitz ein mächtiger elektrischer Funken und das Gewitter ein Process ist, bei welchem grosse Mengen elektrischer Energie zur Wirkung kommen.

Aber auch, wenn kein Gewitter stattfindet, selbst bei wolkenlosem Himmel und ruhiger Luft zeigt die Atmosphäre elektrische Erscheinungen. Um diese nachzuweisen und zu untersuchen bedienten, sich die Physiker ursprünglich wie Franklin des fliegenden Papierdrachens. Erst Beccaria ersetzte denselben durch einen fest ausgespannten Draht, Cavallo durch eine Stange mit veränderlicher Höhe. Saussure und Volta verbesserten die Apparate noch weiter, ersterer indem er sie compendiöser herstellte, letzterer durch Vervollkommnung des damit verbundenen Elektroskops und durch Einführung der die Spitzen an Wirkung ersetzenden oder noch übertreffenden Rauchsäulen oder Flammen.

Zu diesem Zwecke befestigte er an der Auffangstange einen glimmenden Schwamm, eine Lunte, ein Räucherkerzchen oder eine brennende Kerze, welche von der Erde isolirt mit dem Knopfe eines Elektroskops in leitender Verbindung standen. Mit solchen Apparaten wurden bereits Ende des vorigen und Anfangs dieses Jahrhunderts in England und Deutschland, so insbesondere von Schübler in Tübingen, durch 20 Jahre hindurch regelmässige Beobachtungen der atmosphärischen Elektricität angestellt. Diese Beobachtungen ergaben, dass der normale Zustand der Atmosphäre der positiv elektrische sei. Die Höhe des Potentials wechselt jedoch mit der Zeit und mit dem Orte, sowie mit der Beschaffenheit der Atmosphäre.

Im Allgemeinen zeigen sich täglich zwei Minima und zwei Maxima. Das erste Minimum tritt um 5 bis $7^1/_2$ früh, das erste Maximum um 7 bis $9^1/_2$ früh auf; das zweite Minimum erscheint um $2^1/_2$ bis $4^1/_2$ Nachmittags, das zweite Maximum um $6^1/_2$ bis $9^1/_2$ Abends. Im Sommer

ist das erste Minimum und Maximum früher, das zweite Minimum und Maximum später als in den übrigen Jahreszeiten. Erstes Minimum und Maximum sind viel ausgeprägter als zweites Minimum und Maximum. Das Jahresminimum fällt in den Sommer, das Jahresmaximum in den Winter. Wolken, Regen, Schnee, Hagel und überhaupt jede Ansammlung grösserer Wassermassen in der Atmosphäre bringen meistens eine Erniedrigung des Potentials hervor, welches dann nicht bloss auf Null sinken, sondern auch negative Werthe annehmen kann.

Man kann das Alles zusammenfassen, indem man sagt, die Luftelektricität befolgt den umgekehrten Gang, wie Temperatur und Feuchtigkeit.

Es fragt sich nun, was die Anzeige des Elektroskops eigentlich bedeutet. Ursprünglich nahm man an, dass die Luft selbst elektrisch geladen sei und von dieser Ladung dem Elektroskop mittheile.

Sorgfältige Versuche haben es sehr zweifelhaft gemacht, dass die reine trockene Luft überhaupt elektrische Ladung annehmen könne. Wohl ist dies aber mit den in der Luft schwebenden Staubtheilchen der Fall, welche meist negativ elektrisch erscheinen (§. 63). Da auch die staubfreie Luft ausserhalb der Städte und in grösseren Höhen elektrisch und zwar positiv elektrisch erscheint, so ist diese Annahme nicht zulässig.

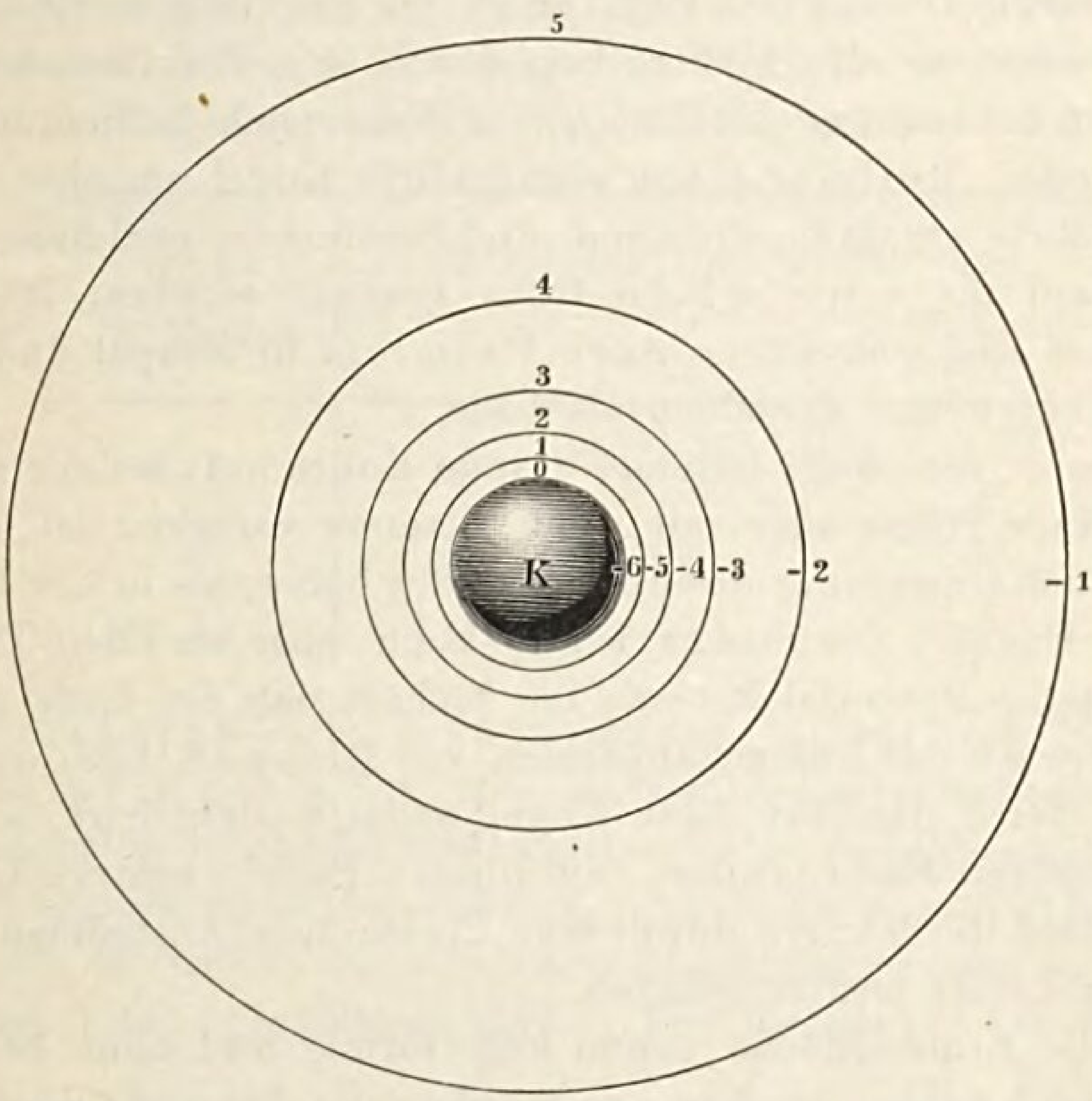
Erman hat zuerst (1803) ausgesprochen, dass die Ladungen des Elektroskops nur Folge eines Influenzvorganges seien. Wenn man nämlich das Elektroskop im Freien zuerst in einer gewissen Höhe zur Erde ableitet, d. h. auf das Potential Null bringt, dann isolirt in grössere Höhe hebt, so zeigt es bei normalem Wetter daselbst positive Elektricität, also ein höheres Potential. Wenn man aber umgekehrt das Elektroskop zuerst in der höheren Lage ableitet, dann rasch senkt, so zeigt es eine negative Ladung.

Horizontaler Transport des Instrumentes ändert nur dann seine Ladung, wenn es dabei einer senkrechten Wand oder einem anderen hervorragenden Objecte genähert oder davon entfernt wird. Es genügt eine Erhöhung von wenigen Metern, um diese Wirkung nachzuweisen. Die Erklärung ist einfach zu geben. Es stelle in Fig. 257 *k* die Erdkugel vor, welche negativ geladen ist. Um dieselbe herum sind eine Anzahl isopotentieller Flächen durch die Kreise angedeutet, welche in solchen Entfernungen gezogen sind, dass ihre Abstände einer Potentialstufe von je $^1/_6$ der ganzen Potentialdifferenz zwischen der Erde und einem Punkte in unendlicher Ferne entsprechen.

Setzen wir das Potential der Erde nach einem willkürlich gewählten Maassstabe beispielsweise $= - 6$, so ist das Potential auf dem ersten Kreise $= - 5$, auf dem zweiten $= - 4$ und so fort, wie auf der Figur längs des horizontalen Radius angeschrieben ist. Diese **absolute** Scala ist aber nicht die übliche, da wir gewöhnlich das Potential der Erde mit Null bezeichnen, wodurch in unserem Falle alle Potentialangaben um $+ 6$ erhöht werden. Die **conventionelle** Scala giebt also für die

verschiedenen Kreise jene Potentialwerthe, welche in der Figur längs des verticalen Radius angeschrieben sind. Wenn wir nun einen Leiter, z. B. eine Kugel, zuerst mit der Erdoberfläche selbst in Berührung bringen, wo sie das Potential nach absolutem Maasse = — 6, nach conventionellem Maasse = 0 annimmt und dann isolirt bis zur vierten Niveaufläche erheben, so hat sie dort das Potential — 2 (absolut) oder + 4 (conventionell). Verbinden wir sie dort leitend mit der Erde, so muss sie wieder auf das Potential der Erde sinken und muss deshalb eine der Potentialdifferenz proportionale Menge negativer Elektricität von der Erde auf die Kugel fliessen. Einen Leiter, welcher negative Elektricität aufnehmen muss, um auf das Potential der Erde zu kommen, sind wir gewöhnt, einen positiv elektrischen Körper zu nennen. In Wahrheit

Fig. 257.



hatte die Kugel eine negative Ladung, denn verglichen mit einem unendlich weit entfernten unelektrischen Körper hat sie ein negatives Potential; nur im Vergleich mit dem der Erde ist dasselbe ein höheres (positives).

Hätten wir die Kugel nur bis zur ersten Niveaufläche gehoben, so hätte sie eine geringere Menge negativer Elektricität aufgenommen, um auf das Potential der Erde zu kommen, sie wäre also weniger stark positiv elektrisch erschienen.

Senkt man daher die in der Höhe abgeleitete und dann isolirte Kugel in die Tiefe, so wird sie dort in Berührung mit der Erde einen Theil der früher zugeführten negativen Elektricität abfliessen lassen, bis sie auf das Potential der Erde gelangt. Wir werden sie daher als negativ elektrisirt ansehen.

Bezeichnen wir allgemein das Potential der Erde mit V_0, das Potential an einem höher gelegenen Punkte mit V, den Radius der Kugel mit R, also auch ihre Capacität mit R. Heben wir die Kugel von der Erde weg auf den höheren Punkt, so ist ihr Potential daselbst $= V$, bei der Ableitung zur Erde muss es aber $= V_0$ werden. Es muss daher eine Elektricitätsmenge $E = - R (V - V_0)$ auf die Kugel fliessen, um sie auf das Potential V_0 zu bringen. Setzen wir, wie üblich, $V_0 = o$, so ist die Ladung, welche die Kugel angenommen, $E = - R V$. Senken wir die Kugel wieder zur Erde herab, so muss sie dort das Potential $V = - \frac{E}{R}$ zeigen.

Diese, in ihrer Wesenheit von Erman stammende Erklärung der elektrischen Erscheinungen in der Atmosphäre wurde, nachdem sie unbeachtet geblieben und vergessen war, von Peltier wieder ausgesprochen und weiter verfolgt; auch hat Peltier zuerst quantitative Bestimmungen angestellt, indem er das Elektroskop durch sein Elektrometer ersetzte. Quetelet in Brüssel und Dellmann in Kreuznach bedienten sich derselben Methode. Dellmann hob eine isolirte Kugel um eine gemessene Strecke, berührte sie dann ableitend, und bestimmte, nachdem sie wieder isolirt und auf die ursprüngliche Höhe gesenkt worden, ihre Ladung mittelst seines Elektrometers. Auch Palmieri in Neapel und P. Sechi in Rom bedienten sich derselben Methode.

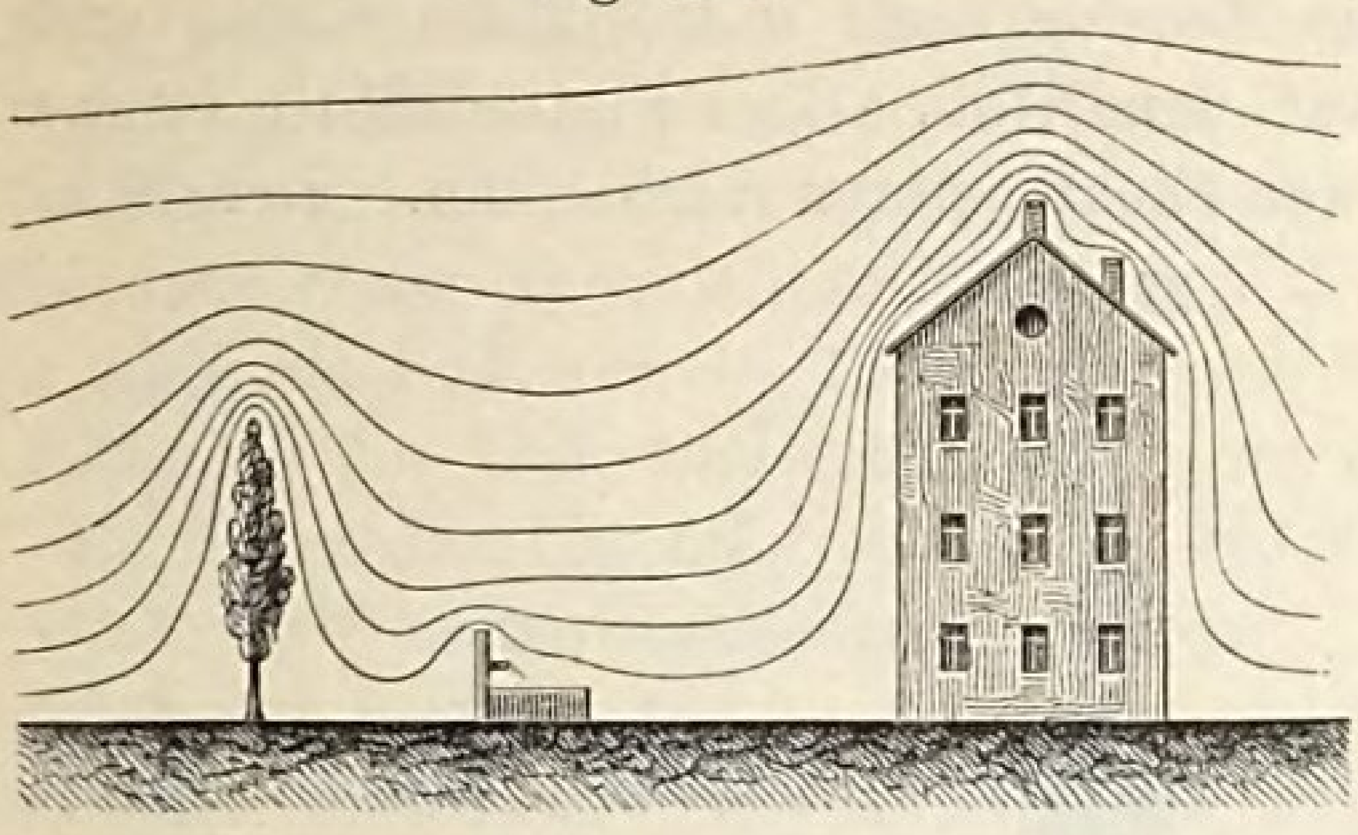
Stellt man eine hohe leitende Stange isolirt auf, welche am oberen Ende mit einer Spitze oder mit einer Flamme versehen ist, so ist das Potential in der Umgebung des oberen Endes höher, als in der Umgebung des unteren Endes. Die Stange selbst kann aber an allen Theilen nur ein und dasselbe Potential haben. Sie verhält sich der Erde gegenüber, wie der Leiter $a b$ des Influenzapparates von Riess (S. 140) der Kugel k gegenüber. Wird daselbst diese Kugel negativ elektrisirt, so wird der Leiter am unteren Ende positive, am oberen Ende negative Elektricität erhalten. Wird die letztere durch eine Spitze zum Abströmen gebracht, so bleibt der Leiter positiv geladen.

Wäre die Erdoberfläche genau kugelförmig und ohne Erhebungen, die Luft überall gleich trocken, so würden die Niveauflächen ebenfalls Kugelflächen sein. Für die relativ geringen Höhen, die unserer Beobachtung zugänglich sind, würde ferner die gleichen Höhenunterschieden entsprechende Potentialdifferenz — das Potentialgefälle — als constant angesehen werden können. Die Unebenheiten der Erdoberfläche haben aber eine entsprechende Verschiebung der Niveauflächen zur Folge, welche sich mit dem Elektrometer, wie F. Exner gezeigt hat, direct nachweisen lässt. Die Fig. 258 mag von diesen Verschiebungen eine beiläufige Vorstellung geben. Ueberall dort, wo leitende Körper mit Spitzen, Ecken oder Kanten hervorragen, werden die nächsten Niveaucurven zurückgedrängt und gleichzeitig zusammengedrängt.

Hierdurch steigert sich an diesen Stellen das Potentialgefälle. Man übersieht sofort, dass in der Nähe einer verticalen Wand die Niveau-

curven aufgerichtet werden, und dass daher an solchen Stellen grössere Verticalabstände den gleichen Potentialzunahmen entsprechen, als an Stellen mit horizontaler Lage der Niveaucurven. Fr. Exner hat dies durch Messungen in einem Hofraume, sowie an einer Felswand, welche 200 m hoch und breit senkrecht in einen See abstürzt, direct nachgewiesen. Er liess zu diesem Zwecke mit einer brennenden Lunte versehene Wasserstoffballons an einem dünnen Drahte emporsteigen, welcher letztere mit einem Elektrometer in Verbindung stand. Er fand in dem letzteren Falle folgende Potentialwerthe, gemessen nach Volt*):

Fig. 258.



Höhe in Metern	Entfernung von der Felswand		
	5 m	35 m	100 m
25	0	70	150
30	0	80	200
40	0	80	230

Das transportable Elektrometer, dessen sich Fr. Exner**) bedient, ist in Fig. 259 (a. f. S.) in $^2/_3$ der natürlichen Grösse abgebildet. In dem cylindrischen mit kreisförmigen Glasplatten verschlossenen metallenen Gehäuse *A* hängen zu beiden Seiten einer feststehenden Kupferplatte *c* von 9 mm Breite die beiden 3 mm breiten Aluminiumstreifen *b*, *b*, welche in abgelenkter Lage gezeichnet sind. Der Träger *D* ist vom Gehäuse isolirt.

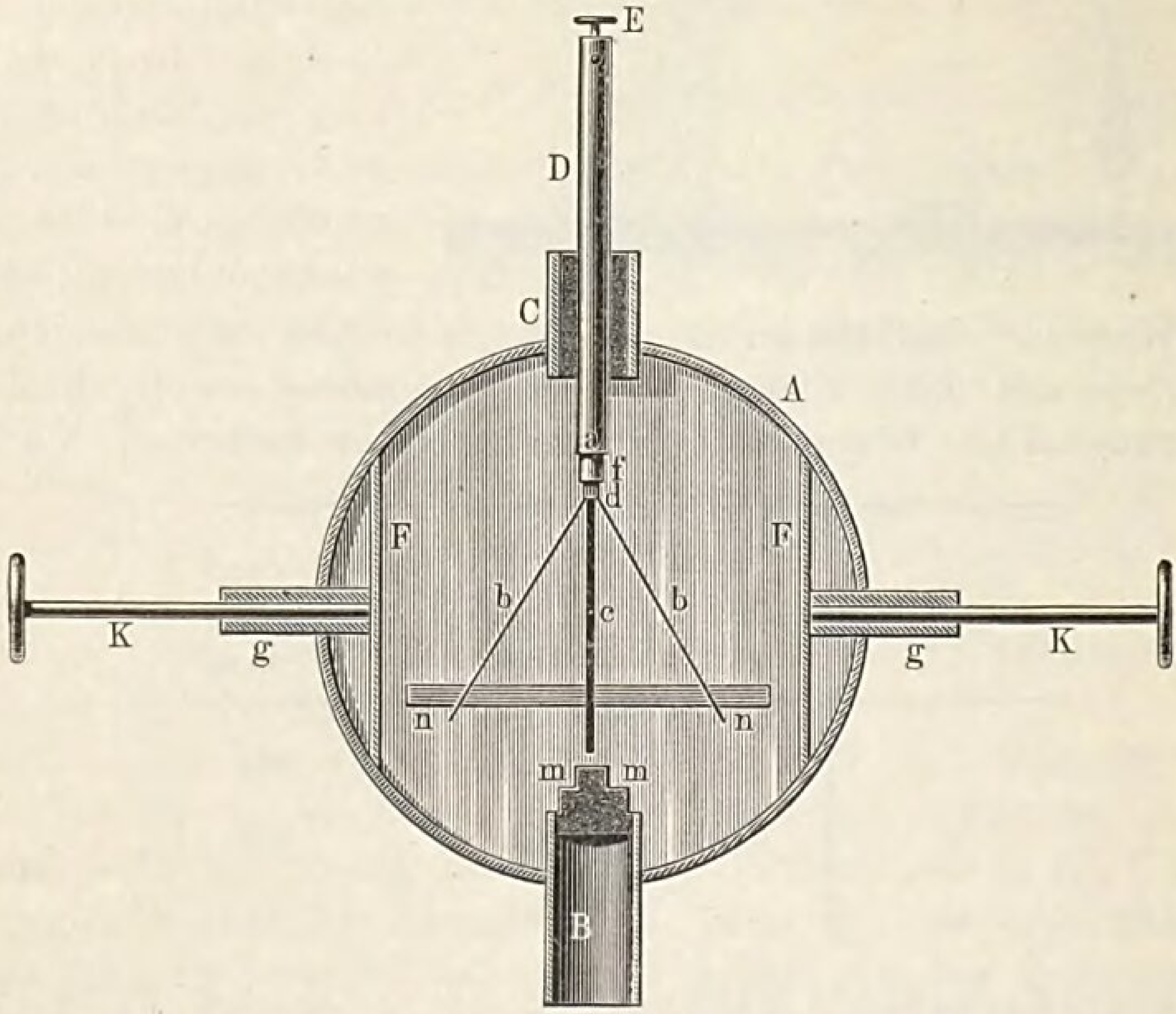
Beim Transporte werden die Schutzplatten *F*, *F* von beiden Seiten herangeschoben und so die Aluminiumblättchen vor Beschädigung geschützt.

An der Innenseite des vorderen Glasdeckels ist eine (in der Figur weggelassene) Millimeterscala und an der rückwärtigen Glasplatte ein Papierstreifen *nn* zum Visiren angebracht. Das Instrument wird mittelst einer Batterie von 200 kleinen Platinzinkelementen à 1,06 Volt calibrirt, so dass aus den abgelesenen Ausschlägen mittelst einer Tabelle die Potentialwerthe erhalten werden können. Beim Gebrauche wird die

*) Dieses dem elektromagnetischen Maasssystem entnommene, später zu besprechende Maass des Potentials entspricht $^1/_{300}$ der elektrostatischen Einheit.
**) Wiener Akademieberichte XCV, 1887.

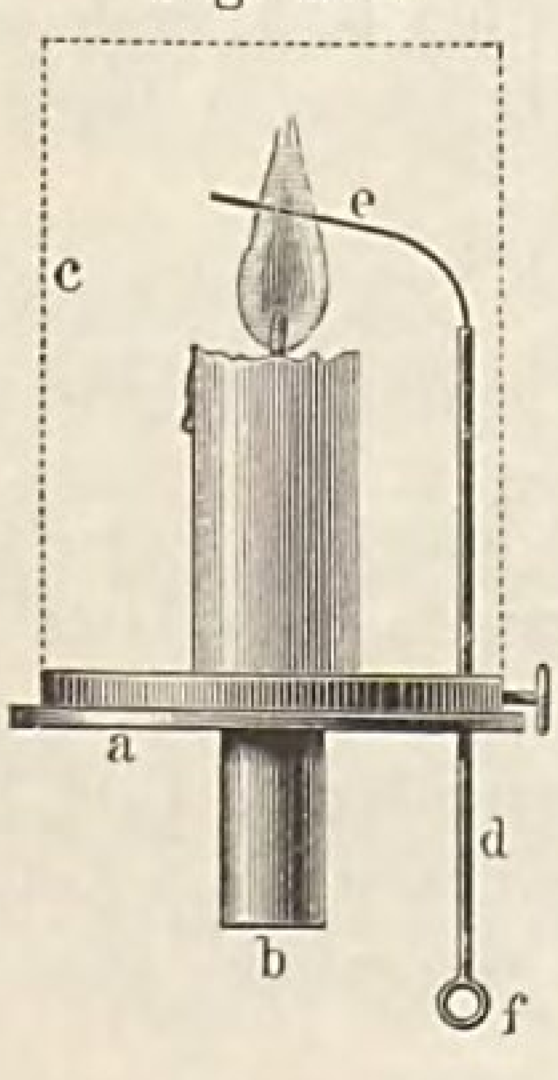
Hülle des Elektrometers durch Halten in der Hand zur Erde abgeleitet, die Klemme *E* dagegen mittelst eines Drahtes mit der auf einem isolirenden Stabe befestigten Lampe verbunden. Die letztere ist in halber Grösse in Fig. 260 abgebildet. Die Messingplatte *a* trägt die Kerze und die Hülse *b* zum Aufstecken auf den Stab. Der Platindraht *e* ist an der Oese *f* mit dem Drahte zum Elektrometer verbunden. Der Schirm *c*

Fig. 259.



schützt vor Luftströmungen. Es genügt, je nach den Umständen, die Flamme in 1 bis 3 m Höhe über dem Boden aufzustellen, um einen der Empfindlichkeit des Instrumentes entsprechenden Ausschlag zu erhalten. Dabei ist darauf zu achten, dass die Niveauflächen nicht durch hervorragende Leiter deformirt werden.

Fig. 260.



Die normale Lage der Niveauflächen wird aber auch dadurch verändert, dass der an der Oberfläche der Erde sich entwickelnde und aufsteigende Wasserdampf negative Elektricität von der Oberfläche mit sich fortführt.

Daher erklärt sich die negative Ladung der Regenwolken und die Verminderung des Potentials der Atmosphäre durch dieselben. Der niederströmende Regen ist negativ elektrisch und giebt der Erde die entführte Ladung wieder zurück.

Die Erman-Peltier'sche Theorie erklärt also die Thatsachen der atmosphärischen Elektricität in genügender Weise und es sind dadurch

die übrigen älteren und neueren Erklärungsversuche, welche auf der Annahme von Elektricitätsentwickelung bei der Verdampfung des Wassers (Volta), oder durch Reibung wasserhaltiger Luft an Eis (Luvini, Sohnke), oder endlich auf unipolarer Induction (Edlund) beruhen, theils ganz, theils wenigstens für die normale atmosphärische Elektricität in den Hintergrund gedrängt. Fr. Exner*) hat aus den von ihm auf verschiedene Weise angestellten Messungen des Potentialgefälles, welches er für trockene Luft auf — 1300 Volt. pro Meter bestimmte, das absolute Potential der Erde und die Grösse ihrer gesammten Ladung berechnet. Er findet das Potential $= - 9 \cdot 10^9$ Volt, die Elektricitätsmenge $= - 2 \cdot 10^{16}$ elektrostatischer Einheiten.

Nach der unitarischen Ansicht wäre dann die negative Elektricität die wirklich existirende, wie auch schon aus anderen Umständen vermuthet worden ist. Der absolute Nullpunkt des elektrischen Potentials läge um 9000 Millionen Volts oder 30 Millionen elektrostatischer Einheiten höher als das Potential der Erde. So lange man also die Harzelektricität als negative und das Potential gleichnamig bezeichnet, giebt es nach der absoluten Scala nur negative Potentiale. Hätte man dies zur Zeit, als die Bezeichnungen der positiven und negativen Elektricität entstanden, bereits gewusst, so hätte man sicherlich dieselben in umgekehrter Weise eingeführt.

Elektricität während der Gewitter. Die Erscheinungen 94
des Gewitters als bekannt voraussetzend, wollen wir hier nur Einiges über die Erklärung der gewaltigen Elektricitätsentwickelung während eines Gewitters, welche zur Entladung von Blitzen bis zur Länge von mehreren Kilometern führt, besprechen. Alle Anzeichen deuten darauf hin, dass nicht die Elektricität die Ursache der übrigen Erscheinungen, so des vorausgehenden Sturmwindes, der Wolkenbildung etc., ist, sondern dass umgekehrt die elektrischen Vorgänge die Folge der letzteren sind.

Die Gewitterwolken haben eine Höhe zwischen 200 und 5000 m. Nehmen wir einmal 3000 m an. Die Wolke sei dadurch entstanden, dass eine feuchte Luftmasse in Folge von Erwärmung von der Erdoberfläche in die Höhe gestiegen sei. Dadurch muss nach den Angaben des vorigen Paragraphen eine Potentialdifferenz zwischen Wolke und Erde von $1300 \times 3000 = 3\,900\,000$ Volt $= 13\,000$ elektrostatischer Einheiten entstehen. Um eine Schlagweite von 12 mm zu erzielen, braucht man schon ungefähr 100 Potentialeinheiten. Wären Schlagweite und Potentialdifferenz einander proportional, so würde den 13 000 Einheiten Potentialdifferenz nur eine Schlagweite von 1,56 m entsprechen. Wenn nun auch die Schlagweiten viel rascher wachsen, als die Potentialdiffe-

*) In der während des Druckes erschienenen Abhandlung: „Ueber die Abhängigkeit der atmosphär. Elektr. vom Wassergehalte der Luft.“ Wiener Akad. Ber. XCVI, II, 419 (1887).

renzen, und wenn auch in der verdünnten Luft die ersteren grösser sind, als beim gewöhnlichen Drucke, so wäre doch damit die Entstehung eines Blitzstrahls von 3000 m Länge noch nicht zu erklären. Es muss also noch eine andere Ursache herangezogen werden, welche die Potentialdifferenzen zwischen Wolken und Erde, sowie der Wolken unter sich bedeutend höher zu steigern vermag. Als eine solche Ursache wurde schon von A. v. Humboldt die Vereinigung kleiner Wassertheilchen zu grösseren Tropfen bezeichnet.

Die kleinen in den Wolken schwebenden Wasserkügelchen, welche sich später zu Tropfen vereinigen, haben nach den Messungen verschiedener Autoren im Mittel ungefähr 0,02 mm Durchmesser oder 0,001 cm Radius. Eine Million solcher Kügelchen hat daher, wenn wir von der gegenseitigen Influenz absehen, eine Capacität = 1000 cm. Vereinigen sich diese Kügelchen zu einem einzigen Tropfen, so erhält derselbe einen Radius = 0,1 cm und demnach eine Capacität ebenfalls = 0,1 cm. Durch die Vereinigung der kleinen Kügelchen zum Tropfen sinkt daher ihre Capacität auf $^1/_{10\,000}$, steigt daher ihr Potential auf das Zehntausendfache.

Wir hätten demnach in dem Aufsteigen leitender Dunstmassen und in der darauf eintretenden Condensation derselben zu Regen eine ausreichende Erklärung für das Auftreten sehr grosser Potentialdifferenzen. Damit soll aber nicht behauptet werden, dass nicht auch noch andere Ursachen mitwirken. Nach einer neueren, fast gleichzeitig von Luvini in Turin und von L. Sohnke in Jena aufgestellten Theorie wäre es die Reibung zwischen Wasser und Eis, welche die Elektricität liefert. Nach Faraday wird nämlich hierbei das Wasser negativ, das Eis positiv elektrisch. Nach der erwähnten Theorie findet diese Reibung in jenen Höhen statt, wo die Temperaturisotherme für Nullgrad liegt. Die positiv elektrisirten Eiskrystalle sollen in den höheren Luftschichten schweben bleiben, die negativ elektrisirte wasserhaltige Luft sich niedersenken. Auf die Schwierigkeiten, auf welche man bei der weiteren Durchführung dieser Theorie stösst, hat Fr. Exner aufmerksam gemacht.

Der Blitz zeigt im Allgemeinen alle Eigenschaften eines elektrischen Funkens, er hat eine äusserst kurze Dauer, seine Bahn ist gezackt, allerdings nicht so scharfe Ecken bildend, wie er oft abgebildet wird, sondern mehr der Form eines Flusslaufes auf einer Landkarte gleichend, ja oft auch sich verästelnd, wie die photographischen Aufnahmen von Blitzschlägen deutlich erkennen lassen.

Die öfter beschriebenen sogenannten Kugelblitze sind eine noch unaufgeklärte Erscheinung. Die Flammenblitze mögen wohl durch eine Wolkenschichte halb verdeckte Blitze sein, welche die vorliegende Wolke hell erleuchten.

Der Donner entsteht durch die Vibrationen der gewaltsam erschütterten Luft. Man sieht das Licht gleichzeitig auf der ganzen Bahn des Blitzes, und auf der ganzen Strecke entsteht auch gleichzeitig der Knall; da sich aber der Schall langsamer verbreitet als das Licht, da er in einer

Secunde nur $^1/_3$ km zurücklegt, so sieht man den Blitz eher, als man den Donner hört. Nehmen wir an, ein Beobachter befinde sich nahe am Ausgangspunkte der Bahn eines Blitzstrahls von 3 km Länge, so wird der Schall von dem entfernteren Ende des Blitzstrahls um 9 Secunden später ankommen, als von dem zunächst gelegenen Ende. Der Beobachter wird daher nicht einen einzigen momentanen Knall, sondern je nach Länge des Strahles und seiner Stellung zur Bahn des Blitzes ein mehr oder weniger lang andauerndes Rollen des Donners wahrnehmen, welches auch noch durch das Echo zwischen Erdoberfläche und Wolken, insbesondere auch an Gebirgswänden verstärkt, verlängert und sonst modificirt wird. Die Entfernung eines Gewitters oder genauer die der nächstgelegenen Stelle einer Blitzbahn wird in Kilometern erhalten, wenn man die Zeit zwischen Blitz und Beginn des Donners in Secunden durch 3 dividirt. In Wegminuten erhält man den Abstand des Blitzes, indem man die Anzahl der Secunden mit 5 multiplicirt.

Wirkungen des Blitzes auf der Erde. Wenn eine elektrische 95
Wolke über dem Erdboden schwebt, so wird sie vertheilend auf denselben wirken; die der Wolke gleichnamige Elektricität wird abgestossen, die ungleichnamige aber wird angezogen und vorzugsweise in allen Leitern und Halbleitern angehäuft werden, die sich mehr oder weniger über die Erde erheben.

Eine allmälige Entladung der elektrischen Wolke oder ein Weiterziehen derselben hat zur Folge, dass auch die durch Vertheilung angehäuft gewesene Elektricität sich allmälig verliert, während eine plötzliche Ausgleichung, ein Rückschlag erfolgt, wenn die elektrische Wolke plötzlich, etwa durch Ueberschlagen eines Blitzes, auf eine andere Wolke entladen wird.

Wenn aber die elektrische Wolke nahe und die durch sie bewirkte elektrische Ladung irgend eines unter ihr auf der Erdoberfläche befindlichen Gegenstandes stark genug geworden ist, so schlägt der Blitz direct zwischen ihnen über. Alles, was sich über die Ebene erhebt, ist vorzugsweise dem Blitzschlage ausgesetzt; daher kommt es, dass so oft Thiere mitten in der Ebene erschlagen werden; unter Umständen ist man jedoch auf einem höher gelegenen Orte über nicht leitendem Boden sicherer als auf einem tiefer gelegenen mit gut leitendem Boden.

Bäume sind schon durch die Säfte, welche in ihnen circuliren, gute Leiter; wenn eine Gewitterwolke über ihnen hinzieht, so findet in den Bäumen eine starke Anhäufung von Elektricität statt, und deshalb sagt man mit Recht, dass Bäume den Blitz anziehen; man darf deshalb während eines Gewitters unter Bäumen, namentlich unter einsam stehenden Bäumen, ja selbst unter einsam in der Ebene stehenden Sträuchen keinen Schutz suchen.

Die Anzahl der vom Blitz getroffenen Menschen ist ziemlich gross. In Frankreich allein wurden von 1835 bis 1863 6714 Menschen vom

Blitz getroffen, wovon 2238 getödtet wurden. Ein sehr grosser Theil derselben hatte dieses Loos dem Verweilen unter Bäumen zuzuschreiben. In Preussen wurden von 1869 bis 1872 369 Menschen erschlagen. In Schleswig-Holstein allein betrug 1873 der durch 97 Blitzschläge verursachte Brandschaden nahe an 300 000 Mark, was nahe 26 Proc. aller Brandschäden zusammen betrug. In Sachsen war die Anzahl der Schaden bringenden Blitzschläge in den 30 Jahren von 1841 bis 1870 gleich 2135. Merkwürdiger Weise ist die Anzahl der Blitzschläge, wie v. Bezold, Gutmann, Holtz und Kassner nachgewiesen haben, seit Ende der dreissiger Jahre in auffallender Zunahme begriffen. Die Gefährdung durch Blitzschlag ist in Deutschland von 1850 bis 1880 auf das Dreifache gestiegen*).

Gebäude sind in der Regel aus Metall, Steinen und Holz zusammengesetzt. Wegen der ungleichen Leitungsfähigkeit dieser Substanzen ist auch die Wirkung der Gewitterwolken auf dieselben sehr verschieden. Wenn der Blitz einschlägt, so trifft er vorzugsweise die besseren Leiter, mögen sie nun frei oder durch schlechtere Leiter eingehüllt sein; die vertheilende Kraft der atmosphärischen Elektricität wirkt auf den in die Wand eingeschlagenen Nagel eben so gut, wie auf die frei in die Luft ragende Windfahne. Als besonders gefährdet sind solche Gebäude zu bezeichnen, welche im Inneren mit grösseren zur Erde abgeleiteten Metallmassen (Gas- und Wasserleitungsröhren) versehen sind. Metalldächer, metallene Ablaufrinnen etc. können zwar auf den Blitz anziehend wirken, vermindern jedoch, insofern sie als Blitzableiter fungiren, die Gefahr einer Beschädigung.

Die mechanischen Wirkungen des Blitzes sind in der Regel sehr heftig. Wenn der Blitz in ein Zimmer einschlägt, so werden die Möbel umgestürzt und zertrümmert, Metallstücke werden aus der Wand gerissen und fortgeschleudert. Bäume werden vom Blitz gespalten und zersplittert, gewöhnlich aber kann man vom Gipfel bis zum Boden eine mehrere Centimeter breite und tiefe Furche verfolgen, die abgeschälte Rinde und die ausgerissenen Späne findet man weit weggeschleudert, und am Fusse des Baumes sieht man oft ein Loch, durch welches die Elektricität sich in den Boden verbreitete.

Die physikalischen Wirkungen des Blitzes beweisen eine mehr oder minder bedeutende Temperaturerhöhung. Wenn der Blitz ein Strohdach, trockenes Holz, ja grüne Bäume trifft, so findet eine Verkohlung, meistens sogar eine Entzündung statt; bei Bäumen findet man jedoch seltener Spuren von Verkohlung. Metalle werden durch den Blitz stark erhitzt, geschmolzen oder verflüchtigt. Wiederholte Blitzschläge bringen auf hohen Bergen sichtbare Spuren von Schmelzung an den Felsen hervor.

*) Siehe die Broschüre: „Die Blitzgefahr". I. Herausgegeben vom Elektrotechnischen Verein. Berlin 1886.

Der Blitzableiter. Derselbe ist eine segensreiche Erfindung Franklin's. Die erste Ausführung seines Vorschlages, die Elektricität der Wolken durch aufgerichtete Metallspitzen auf die Erde zu entladen, erfolgte durch die Franzosen Delibard und Delor in Paris 1752. Der erste eigentliche Blitzableiter in Europa wurde von dem Oesterreicher Procop Divisch, Pfarrer zu Prenditz bei Znaym in Mähren, 1754 errichtet, nachdem schon im Jahre vorher Winkler unabhängig von Franklin die Anlegung der Blitzableiter empfohlen und Vorschriften dazu gegeben hatte. 96

Der Blitzableiter besteht aus einer ununterbrochenen metallischen Leitung von genügendem Querschnitte, welcher den Erdboden mit einer über dem zu schützenden Objecte hervorragenden Auffangspitze verbindet, um der Entladung einen unschädlichen Weg zu bahnen. Man unterscheidet demnach an der ganzen Leitung drei Theile, die Auffangstange mit Spitze, die Ableitung bis zur Erde, endlich die Erdleitung.

Diese Theile müssen folgenden Bedingungen entsprechen:

1. Die Spitze soll Alles überragen, ferner aus einem Metall bestehen, das der Oxydation widersteht und, bei gutem Leitungsvermögen, einen hohen Schmelzpunkt hat.

2. Die Zahl und Höhe der Auffangstangen muss im Verhältniss zur Grösse und Construction des zu schützenden Objectes stehen.

3. Die Ableitung zur Erde muss überall den zur Leitungsfähigkeit des verwendeten Metalles erforderlichen Querschnitt haben, ohne dabei zu schwer zu sein, und muss für die Dauer der Zerstörung durch Luft und elektrische Einflüsse Widerstand leisten, ferner möglichst aus einem Stück bestehen und sich leicht und geschmeidig mit Vermeidung aller scharfen Ecken anbringen lassen.

4. An allen Stellen, wo die verschiedenen Theile der Leitung verbunden sind, muss die möglichst breite Berührungsfläche für die Dauer solid und rein metallisch sein.

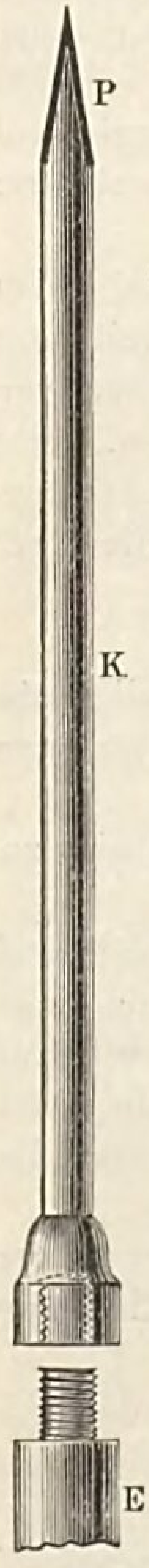
5. Alle grösseren Metallmassen in der Nähe müssen mit dem Ableiter durch Nebenleitungen verbunden werden und darf mithin eine Isolirung nicht stattfinden.

6. Das untere Ende der Ableitung, Erdleitung genannt, muss mit der Erde selbst in möglichst inniger, grossflächiger und überhaupt möglichst widerstandsloser Verbindung stehen.

Von diesen Bedingungen ist die wesentlichste die vollkommen gut leitende Verbindung zwischen Spitze und Erde. Weniger wichtig ist die Beschaffenheit der Spitze. Ist die Spitze stumpf, so wird allerdings das Ausströmen der von der Gewitterwolke hervorgerufenen Influenzelektricität und die dadurch bewirkte Verminderung der Potentialdifferenz erschwert, es kommt daher eher zu einem Blitzschlage, als bei scharfer Spitze, aber derselbe wird der Leitung folgen und, wenn dieselbe gut ist, dem Objecte nicht schaden. Wenn aber die Leitung unterbrochen

oder die Verbindung mit dem Boden unvollkommen ist, so kann der Blitz ebenfalls einschlagen, er wird sich aber auch seitwärts auf andere Leiter verbreiten, und eben solche Zerstörungen anrichten, als ob gar kein Blitzableiter vorhanden wäre.

Fig. 261.



Noch mehr: Ein Blitzableiter, welcher diesen Fehler hat, ist sehr gefährlich, selbst wenn der Blitz nicht einschlägt; denn wenn an irgend einer Stelle der Leitung die Elektricität hinlänglich angehäuft ist, so kann ein Funken seitwärts überschlagen, welcher irgend Gegenstände zertrümmern oder entzünden kann.

Fig. 262.

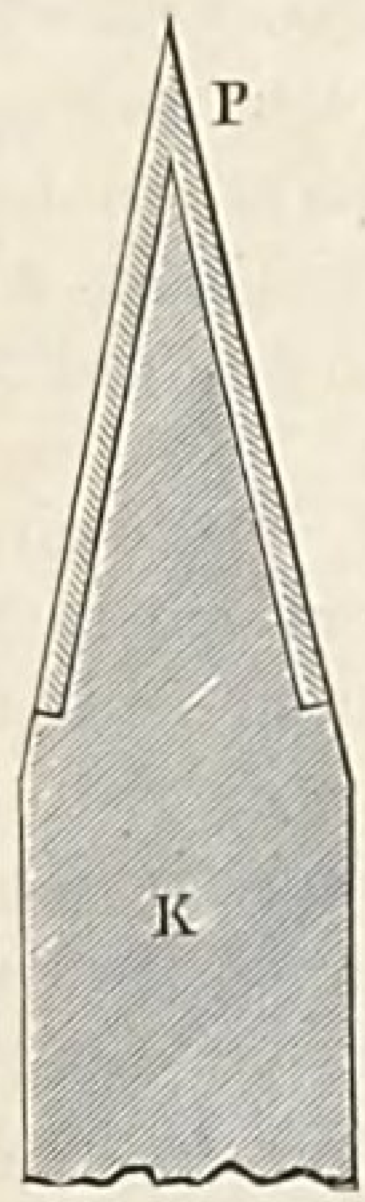
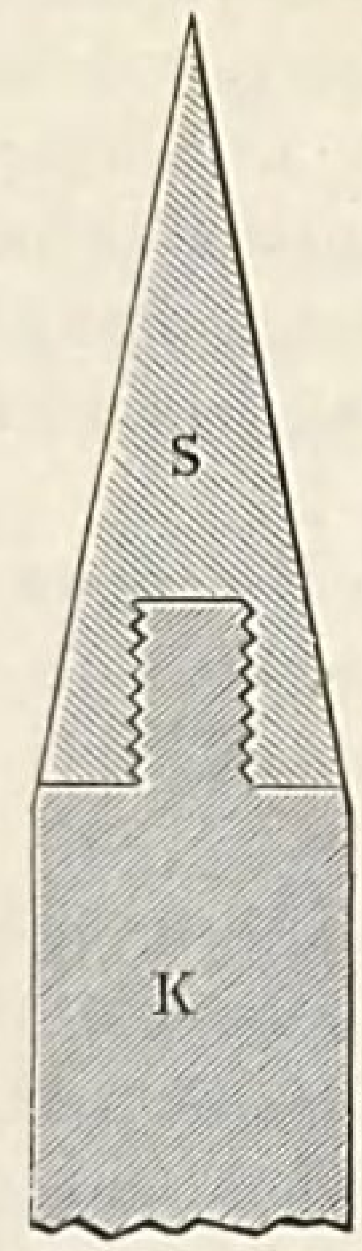


Fig. 263.



Professor Richmann in St. Petersburg wurde 1753 durch einen Funken aus einem Blitzableiter, dessen Ableitung er zur Anstellung von Experimenten unterbrochen hatte, getödtet.

Fig. 261 stellt die Spitze eines Blitzableiters dar, wie sie von Gebrüder Mittelstrass, Magdeburg, angewendet wird und die sich durch Solidität und Billigkeit auszeichnet. Auf meist 4 m hohen eisernen Stangen von $2\frac{1}{2}$ bis 3 cm Durchmesser ist ein Gewinde *E* eingeschnitten, worauf eine 40 cm lange, ca. 15 mm dicke Kupferstange *K* aufgeschraubt wird. Die letztere endet in einer spitzen Platinhülse *P*, die mit reinem Silber aufgelöthet ist; siehe Fig. 262 in natürlicher Grösse. Ebenso gut eignet sich auch eine massive, aus reinem Silber gefertigte Spitze, Fig. 263.

Bei kleineren Blitzableitern kann die Spitze ebensowohl aus Kupfer, das im Feuer vergoldet wird, oder, was in den meisten Fällen auch genügen wird, einfach aus verzinktem Eisen bestehen. Es ist überhaupt empfehlenswerth, die verfügbaren Mittel mehr zur tadellosen Herstellung der Ableitung zur Erde als zur Ausstattung der Auffangspitzen zu verwenden.

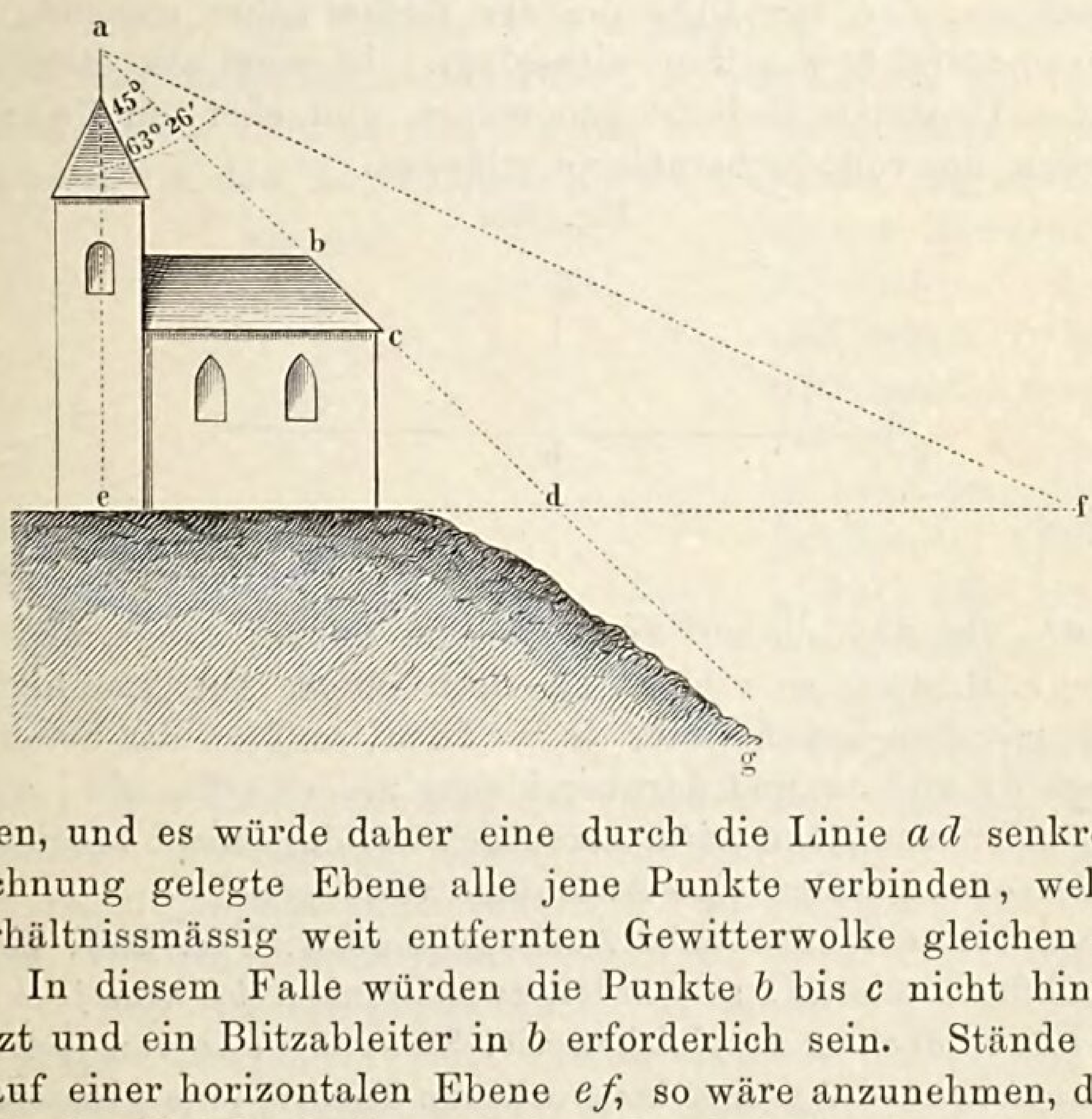
Die Vergoldung leitet zwar die Elektricität nicht besser, doch schützt sie die Spitze vor Oxydation.

Die frühere Vorschrift von Gay-Lussac, sehr dünne Platinspitzen anzuwenden, hat sich nicht bewährt, da bei Blitzschlägen dieselben schmelzen.

Messing darf zu keinem Theile des Blitzableiters benutzt werden, da dieses Metall in Folge von atmosphärischen und elektrischen Einflüssen so spröde wird, dass es ganz zerbröckelt.

Was den „Schutzkreis" des Blitzableiters, das ist den Umfang des Raumes, innerhalb welchem die Objecte vor Blitzschäden gesichert sind, betrifft, so lässt sich aus zwei Gründen keine allgemein gültige Regel wissenschaftlich begründen. Der erste Grund besteht darin, dass man nicht allgemein angeben kann, unter welchem Winkel mit dem Horizonte noch Blitzschläge erfolgen können. Betrachten wir als Beispiel das in Fig. 264 angedeutete Object. Würden alle Blitze nur senkrecht niedergehen, so wäre die Thurmspitze *a* das der Gewitterwolke nächst stehende Object und es würde in normalen Fällen genügen, in *a* einen Blitzableiter anzubringen, um damit zugleich auch die Dachkante *b c*, also überhaupt das ganze Object, geschützt zu haben. Nehmen wir aber an, die Gewitterwolke sei ebenso weit in horizontaler Richtung entfernt, als sie hoch über *a* schwebt, so würde ein aus ihr ausgehender den Punkt *a* treffender Blitzstrahl mit dem Horizonte einen Winkel von 45° ein-

Fig. 264.

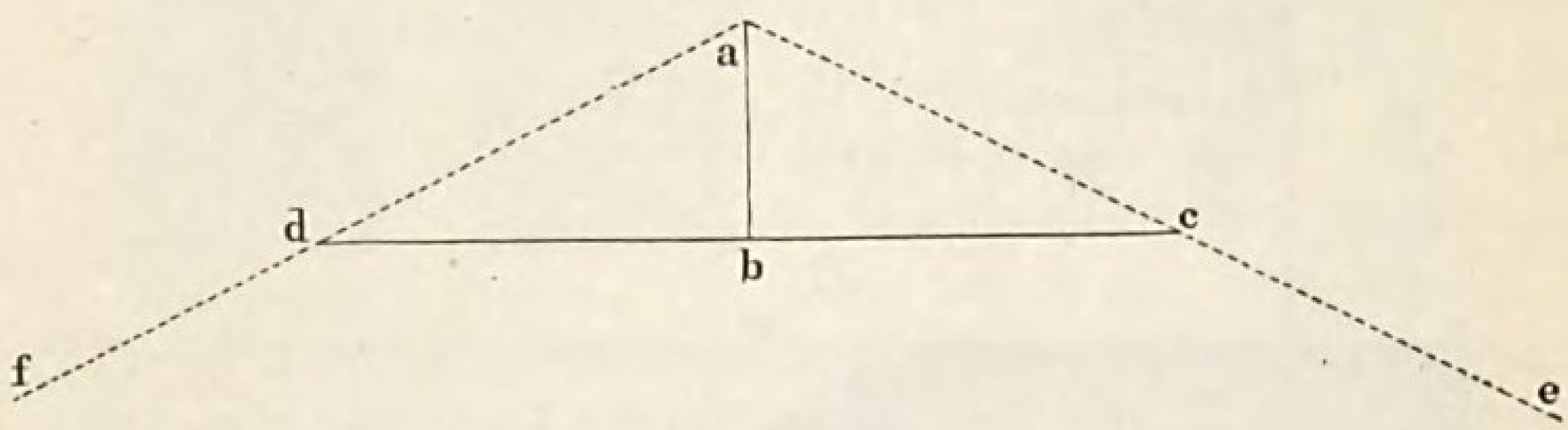


schliessen, und es würde daher eine durch die Linie *a d* senkrecht auf die Zeichnung gelegte Ebene alle jene Punkte verbinden, welche von der verhältnissmässig weit entfernten Gewitterwolke gleichen Abstand haben. In diesem Falle würden die Punkte *b* bis *c* nicht hinreichend geschützt und ein Blitzableiter in *b* erforderlich sein. Stände das Gebäude auf einer horizontalen Ebene *e f*, so wäre anzunehmen, dass eher ein Punkt der Erdoberfläche zwischen *d* und *f* getroffen würde, als die Punkte *a*, *b* oder *c*. Stände aber z. B. das Gebäude an einem Abhange, deren Punkte, z. B. *g*, sämmtlich weiter von der Gewitterwolke entfernt sind, so wäre offenbar ein Blitzableiter in *a* allein durchaus unzureichend. In der Praxis wird nun angenommen, dass die Gewitterwolke, aus der ein Blitzschlag zu befürchten wäre, mindestens eine noch einmal so grosse Höhe als horizontale Entfernung besitze, dass mithin der Winkel, den der Blitzstrahl mit dem Horizonte bildet, mindestens 63° 26′ betrage.

In diesem Falle würde in der obigen Figur die Linie *af* die gleich stark gefährdeten Punkte andeuten und man ersieht dann sofort, dass ein in *a* angebrachter Blitzableiter das ganze Object schützt, falls nicht in Folge besonderer, unten zu besprechender Ursachen die Punkte *b* bis *c* stärker bedroht sind. Denkt man sich also die Spitze eines Blitzableiters als Spitze eines Kegels, dessen Seite mit der Axe einen Winkel von $63^0 26'$ einschliesst, oder, was dasselbe sagt, dessen Basishalbmesser das Doppelte der Höhe ist, so betrachtet man alle Objecte als geschützt, welche innerhalb der Mantelfläche des Kegels fallen.

Der zweite Grund, der unter Umständen die oben angegebenen Regeln ungenügend erscheinen lässt, beruht auf dem Einfluss der ungleichen Leitungsfähigkeit der Objecte. Wäre beispielsweise in Fig. 264 der Thurm aus schlecht leitendem Mauerwerk bestehend, dagegen das Innere des angebauten Hauses durch eiserne Gas- oder Wasserleitungen mit der Erde in gut leitender Verbindung, so wäre die Wahrscheinlichkeit vorhanden, dass der Blitz die der Wolke näher stehende Thurmspitze verschonend in das Haus einschlägt. Es muss also stets auf alle bestehenden Umstände Bedacht genommen, und eher ein Uebriges gethan werden, um volle Sicherheit zu erlangen.

Fig. 265.



Ist *ab*, Fig. 265, die auf *dc* senkrechte Auffangstange, und beträgt ihre Höhe z. B. 4 m, so schützt sie nach obiger Annahme nicht allein den Kreis mit dem Durchmesser $dc = 16$ m, sondern der Schutz reicht noch längs *df* und *ce* und darüber hinaus um eine Strecke, welche zu 20 bis 25 m angenommen wird, vorausgesetzt, dass nicht besondere Umstände, wie oben gezeigt, eine Ausnahme verlangen.

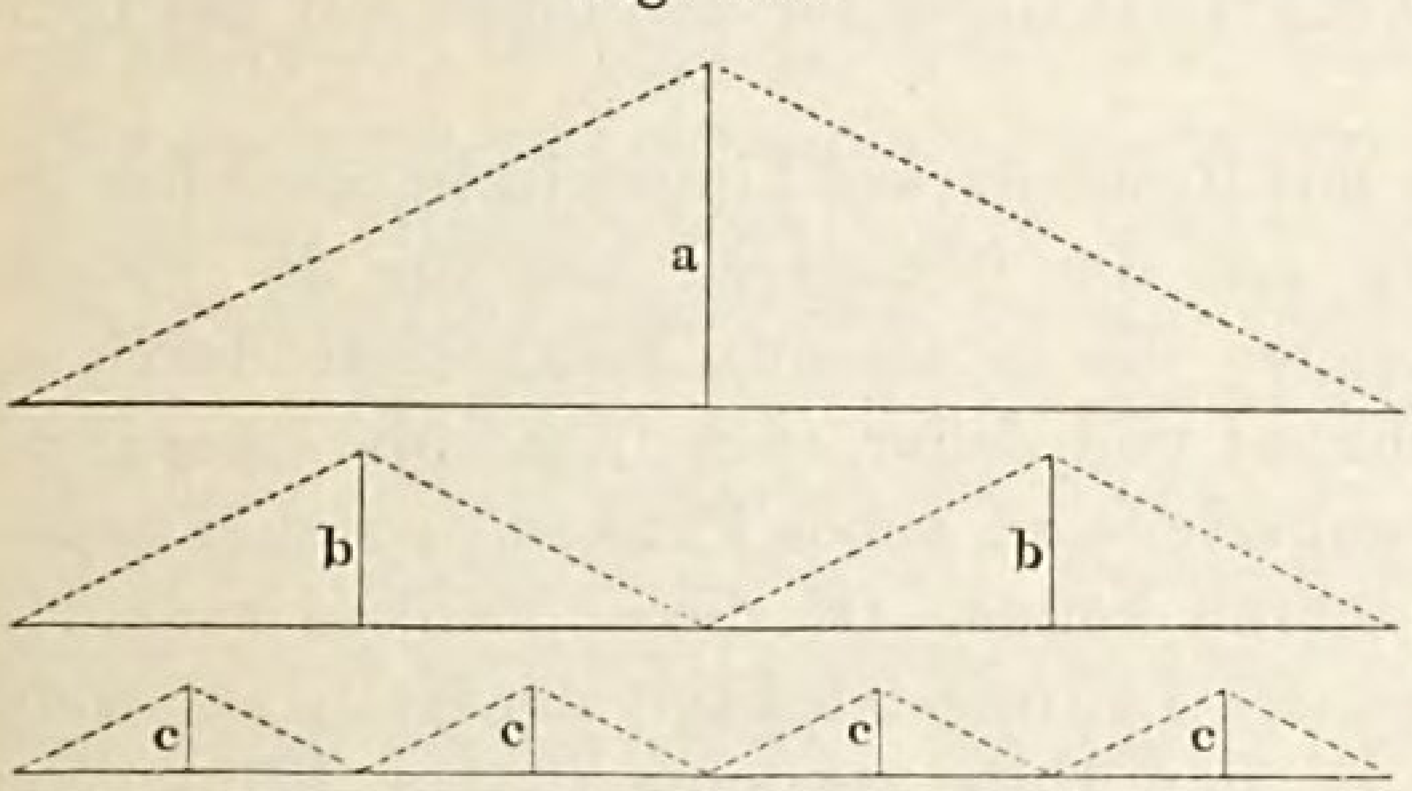
Wenn nun eine 8 m hohe Auffangstange *a*, Fig. 266, eine 32 m lange Dachfirste schützt, so würden zwei Stangen *bb* von je 4 m Höhe dieselbe Länge decken, desgleichen vier Stangen *cccc* von je 2 m Höhe. Da nun aber nach der vorher besprochenen Theorie eine grössere Anzahl von Spitzen mehr Elektricität ausströmen lassen, als eine einzelne, so ist es rathsam, zum kräftigeren Schutz lieber mehr Auffangstangen, wenn auch weniger hoch, zu wählen, zumal zwei mittelhohe Stangen billiger sind, als eine grosse von doppelter Höhe und gleicher Festigkeit.

Für die Ableitung von der Auffangstange bis zur Erde ist zunächst die Frage nach dem geeignetsten Materiale zu beantworten, wobei nur zwischen Kupfer und Eisen zu wählen ist. Für das Kupfer spricht die ungefähr siebenmal grössere Leitungsfähigkeit, die geringere

Zerstörbarkeit durch Oxydation, die leichtere und geschmeidigere Anbringung, insbesondere in Form von Kupferseil. Es wird daher meistens ein aus sieben Einzeldrähten gewundenes Kupferseil von 5 bis 7 mm Durchmesser empfohlen.

Für das Eisen spricht der billigere Preis, der höhere Schmelzpunkt und die grössere Festigkeit der Leitung gegenüber mechanischen Angriffen. Es ist nicht richtig, dass der Querschnitt im selben Verhältniss grösser sein müsse wie der Leitungswiderstand. Eine Eisenleitung von siebenmal so grossem Querschnitt, wie eine sonst gleiche Kupferleitung, giebt allerdings bei gleichem Elektricitätsstrome gleiche Wärmemenge wie letztere, da aber das Eisen die specifische Wärme = 0,113, das Kupfer = 0,094 besitzt, so ist, um gleiche Temperatursteigerung zu erfahren, der Querschnitt des Eisens nur $7 \frac{0,094}{0,113} = 5,8$ mal, mithin der Durchmesser nur $\sqrt{5,8} = 2,4$ mal oder rund $2^1/_2$ mal so gross zu wählen wie der des Kupfers*). Da überdies der Schmelzpunkt des Schmiedeeisens im Minimum bei 1600⁰, der des Kupfers bei 1330⁰ liegt, so ist eine eiserne Leitung von 5,8 mal so grossem Querschnitt immer noch sicherer vor dem Abschmelzen als die kupferne, und sie könnte aus diesem Betracht auf den 4,7 fachen Querschnitt (2,2 fachen Durchmesser) herabgesetzt werden. Dabei ist ihr Preis noch immer geringer als jener der kupfernen Leitung. Demgemäss wäre eine Leitung aus gewalztem Eisen oder ein Drahtseil von ungefähr 1 bis 2 qcm Querschnitt zu empfehlen. Der Hauptnachtheil der eisernen Leitung ist ihre leichtere Zerstörbarkeit durch Rosten, welche durch Feuchtigkeit, durch den Rauch der schwefelhaltigen Kohlenfeuerungen und durch den Contact mit elektronegativen Metallen (Kupferdächern) befördert wird. Es empfiehlt sich deshalb, verzinktes Eisen anzuwenden. An schwer zugänglichen Stellen, wo ein öfteres Nachsehen nicht thunlich, sowie überall dort, wo ein Rosten besonders zu fürchten ist, wird man daher dem Kupfer wegen seiner grösseren Haltbarkeit den Vorzug geben.

Fig. 266.



Die gute Wirkung der Ableitung hängt aber ausserdem noch von den soliden Verbindungen der einzelnen Theile ab; dieselben müssen mittelst 8 cm langer starker Bänder aus gleichem Materiale fest zusammengeschraubt und verlöthet sein. Mit der Hauptleitung, welche auf

*) In dem Gutachten der Berliner Akademie vom 5. August 1880 ist, wie uns scheint, Durchmesser mit Querschnitt verwechselt.

möglichst kurzem Wege von der Spitze zur Erde führt, müssen durch Nebenleitungen alle grösseren in der Nähe befindlichen Metallmassen verbunden sein, damit alle Elektricität zum Ableiter strömen kann und somit jede Spannung aufgehoben wird. Wäre dies nicht der Fall, oder wollte man gar die Leitung durch Porcellanhülsen isoliren, so würden sich beim Gewitter in den anderen Metalltheilen Influenzströme bilden, die fast ebenso gefährlich wie ein kleiner Blitzschlag werden können.

Bezüglich der Frage, ob eine einzige Ableitung genügt, oder es sich empfiehlt, mehrere an verschiedenen Seiten des Gebäudes anzubringen, haben wir noch Einiges zu bemerken.

Von dem Satze ausgehend, dass sich eine elektrische Ladung immer nur auf der äusseren Oberfläche eines Leiters befindet, hat Melsens empfohlen, solche Gebäude, welche, wie z. B. Pulvermagazine etc., besonders sicheren Schutz bedürfen, in ein Netz von Drähten, gewissermaassen in einen Drahtkorb einzuschliessen und diesen zur Erde gut abzuleiten. Eine solche Schutzhülle erscheint nun freilich als die beste, aber sie ist nicht überall anzubringen; man wird sich aber diesem Ideal desto mehr nähern, je mehr Ableitungen an den verschiedenen Seiten des Gebäudes angebracht werden, und wird dabei, wie Zenger hervorhebt, auf eine symmetrische Anordnung achten, um ein Gleichgewicht zwischen den Inductionswirkungen entgegengesetzt liegender Leitungen auf das Innere zu erzielen.

E. Mach*) hat jedoch mit Recht darauf hingewiesen, dass der Satz von dem Sitze der Ladung auf der Oberfläche nur für die ruhende Elektricität gelte, dass dagegen die strömende Elektricität durch den ganzen Querschnitt hindurchgehe und daher auch innerhalb eines Drahtkorbes an einer Unterbrechungsstelle zu einem Funken, beziehungsweise zu schädlichen Wirkungen führen könne. Ob dieser Funken verhindert wird, hängt offenbar nur von der Leitungsfähigkeit der Hülle ab, welche so gross sein muss, dass an den Unterbrechungsstellen keine einen Funken ermöglichende Potentialdifferenz auftreten kann. E. Mach stellte, um dies zu constatiren, Versuche mit einer Hülle aus Drahtgeflecht, sowie mit einer solchen aus Goldpapier an. Führt man innerhalb dieser Hüllen einen Kupferdraht von oben nach unten, bringt an diesem Drahte in der Mitte eine Unterbrechungsstelle an, so dass sich daselbst Funken von etwa 1 mm Länge bilden können, legt daselbst zwischen die Spitzen eine kleine Quantität Knallsilber, welches für schwache Funken sehr empfindlich ist, leitet endlich eine kräftige Flaschenentladung durch die Hülle, so explodirt das Knallsilber nicht in der Drahthülle, wohl aber in der Hülle von Goldpapier.

Führt man denselben unterbrochenen Draht ausserhalb der Hülle vom oberen Ende derselben zum unteren, so tritt wiederum beim Drahtkorb keine Explosion ein, wohl aber bei der Goldpapierhülle. Die letz-

*) Wiener Akadem. Ber. LXXXVII, 1883, S. 632.

tere leitet schlecht genug, um eine Funkenbildung an der Unterbrechungsstelle zu ermöglichen.

Hieraus folgt, dass die Blitzableitertheorie von Melsens modificirt werden müsse und dass auch eine einseitige, beziehungsweise eine einzige Ableitung, wenn sie nur alle anderen Wege an Leitungsfähigkeit genügend weit übertrifft, einen ausreichenden Schutz zu gewähren vermag.

Dass aber eine einzige solche, wenn auch tadellose Ableitung unter Umständen zu gefährlichen Seitenentladungen Anlass geben kann, wenn durch letztere eine kürzere oder bessere Verbindung mit der Erde hergestellt wird, haben die höchst instructiven Versuche von A. Töpler*) dargethan, auf welche wir hier verweisen wollen.

Besondere Aufmerksamkeit ist noch der Erdableitung zu widmen. Auf je zwei bis drei Auffangspitzen rechnet man eine Erdleitungsplatte von Kupfer, Eisen (oder Zink) von mindestens 1 qm einseitiger Oberfläche, falls die Platte in das Grundwasser zu liegen kommt, von 2 qm, wenn dieselbe nur in das feuchte Erdreich versenkt wird. Befindet sich in der Nähe des Blitzableiters ein Ziehbrunnen, Fluss oder See, so versenkt man hier hinein die Erdleitungsplatte; nie jedoch in ein wasserdicht ausgemauertes Wasserreservoir. Sollte in der Nähe des Blitzableiters die Erde selbst in grösserer Tiefe kein Grundwasser enthalten, so führt man die Ableitung zur feuchtesten Stelle des Bodens und lässt sie in eine noch grössere Metallplatte, wie vorhin angegeben, enden. Ausserdem ist es räthlich, noch einige Quererdleitungen anzubringen. Die früher empfohlene Umgebung der Erdplatte mit Kohle wird neuestens wiederum missrathen. Durch galvanische Einwirkung der Kohle auf die Metallplatte entsteht nämlich ein Strom, der die Oxydation und Zerstörung der Metallplatte befördert. Dasselbe ist der Fall, wenn die Platte unterhalb des feuchten Erdreichs mit einer Drahtleitung aus einem anderen Metall verbunden ist. Aus diesem Grunde ist es am rathsamsten, die Platte aus Kupfer oder Eisen zu wählen, je nachdem der Ableitungsdraht aus Kupfer oder Eisen ist.

In der Nähe des Hauses befindliche oder ins Haus hineinführende Gas- oder Wasserleitungsröhren müssen unbedingt mit der Ableitung in leitende Verbindung gesetzt werden. Dagegen darf man dieselben nicht als Ersatz für die Erdplatte betrachten, wenn die einzelnen Stücke solcher Röhrenleitungen durch isolirende Medien unterbrochen sind. In dieser Hinsicht war ein Blitzschlag zu Basel am 9. Juni 1849 sehr lehrreich. Derselbe entlud sich in den Blitzableiter eines Wohnhauses, verfolgte die Leitung desselben bis in den Boden, sprang aber alsdann auf eine nahe liegende gusseiserne Brunnenleitung über; auf mehr als $^1/_4$ Stunde Wegs wurden alle gusseisernen Röhrenstücke da, wo sie in einander gesteckt und mit Pech gedichtet waren, zerschmettert, so dass alle durch diese Leitung gespeisten Brunnen zu laufen aufhörten. Einen ähnlichen Fall hat A. Secchi aus Alatri 1872 mitgetheilt.

*) Elektrotechn. Zeitschr. 1884, S. 241, 246.

Grössere eiserne Gas- oder Wasserleitungen, deren Röhren durch Bleiguss gedichtet sind, ersetzen dagegen die Erdplatten nicht nur vollständig, sondern bilden die beste Erdableitung, die man finden kann.

In Ermangelung von Platten können auch Metallstangen von 1 qcm Querschnitt und wenigstens 5 m Länge, welche horizontal in das Grundwasser versenkt werden, Anwendung finden.

Da es von der grössten Wichtigkeit ist, dass die metallische Leitung von der Spitze des Ableiters bis zum Boden ununterbrochen sei, so ist es wünschenswerth, sich davon überzeugen zu können, dass diese Bedingung erfüllt sei. In neuerer Zeit hat man dazu den galvanischen Strom angewandt. Führt man nämlich von dem einen Pole einer galvanischen Kette einen Kupferdraht zum oberen, vom andern Pole einen solchen zum unteren Ende des Blitzableiters, so ist derselbe in den Schliessungsbogen der Kette eingeschaltet. Ein an passender Stelle in diesen Schliessungsbogen eingeschaltetes Galvanometer muss unter diesen Umständen den Strom anzeigen, wenn die Leitung nicht unterbrochen ist.

Will man untersuchen, ob die Erdleitungsplatte mit dem feuchten Boden in genügender Verbindung ist, so wird von einem Pole des Elementes ein Kupferdraht an der Blitzableitung oberhalb der Erde befestigt, vom anderen Pole führt man einen Kupferdraht, woran eine circa 1 qm grosse Metallplatte befestigt ist, nach einem in der Nähe des Blitzableiters befindlichen Brunnen und senkt die Platte in das Wasser. — Ist kein Brunnen in der Nähe, so wird die Platte in die feuchte Erdschicht eingegraben.

Das zwischen der Erdleitung des Blitzableiters und der anderen zur Untersuchung eingegrabenen Metallplatte liegende feuchte Erdreich bildet den Schliessungsbogen der galvanischen Kette und muss das eingeschaltete Galvanometer ebenfalls den Strom nachweisen. Aus dem Entstehen eines Ausschlages der Magnetnadel am Galvanoskop kann man jedoch noch keineswegs auf die vollkommene Leitungsfähigkeit und Sicherheit des Blitzableiters schliessen, denn wenn z. B. das Metallseil an verschiedenen Stellen bis auf einen Draht zerschnitten wäre, würde dennoch ein Ausschlag erfolgen. Es ist deshalb immer nöthig, den Blitzableiter noch einer genauen Besichtigung zu unterziehen.

Einen zur Untersuchung von Blitzableitern geeigneten Apparat haben die Gebr. Mittelstrass in Magdeburg construirt; Fig. 267 zeigt dessen äussere Ansicht, Fig. 268 stellt denselben im Durchschnitt dar. Auf dem Deckel eines leicht transportablen Holzkastens befindet sich eine mit isolirtem Kupferdraht umwundene und mit Arretirung versehene Bussole; der Kasten selbst enthält ein Zinkkohlenelement ohne Thonzelle mit Füllung von einem Theil doppeltchromsaurem Kali, einem Theil Schwefelsäure und 20 Thln. Wasser oder auch nur eine einfache Salzwasserfüllung.

Nach jedem Gebrauche wird Kohle und Zink in das daneben befindliche leere Glas gesteckt und das mit Flüssigkeit gefüllte Glas mit

dem Glasstöpsel verschlossen. Ausserdem befinden sich noch im Apparat Klemmschrauben und eine Rolle mit isolirtem Kupferdraht. Die beiden Klemmschrauben, um das Galvanoskop einzuschalten, sind aussen am Apparat an der Seite befestigt.

Fig. 267.

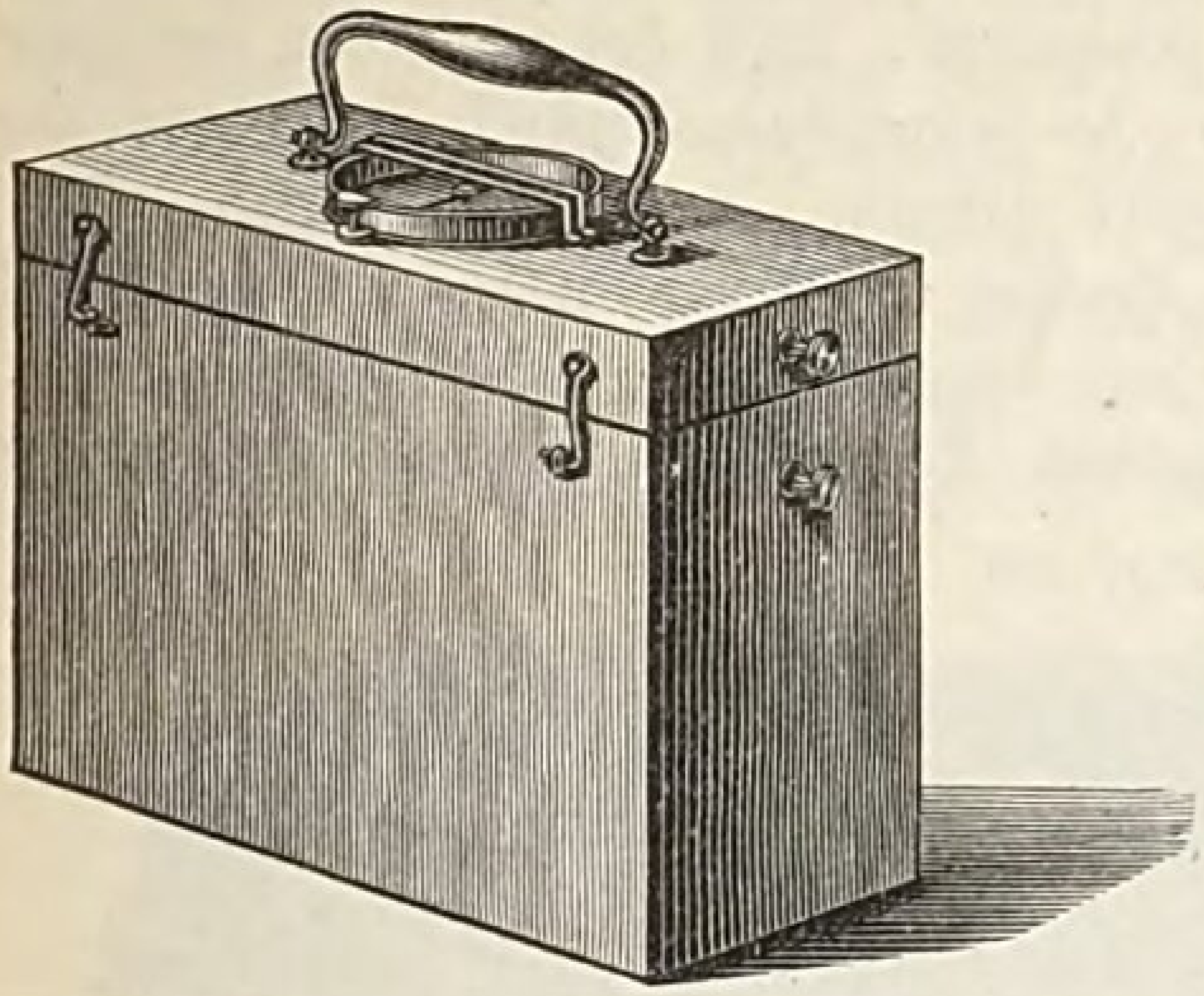
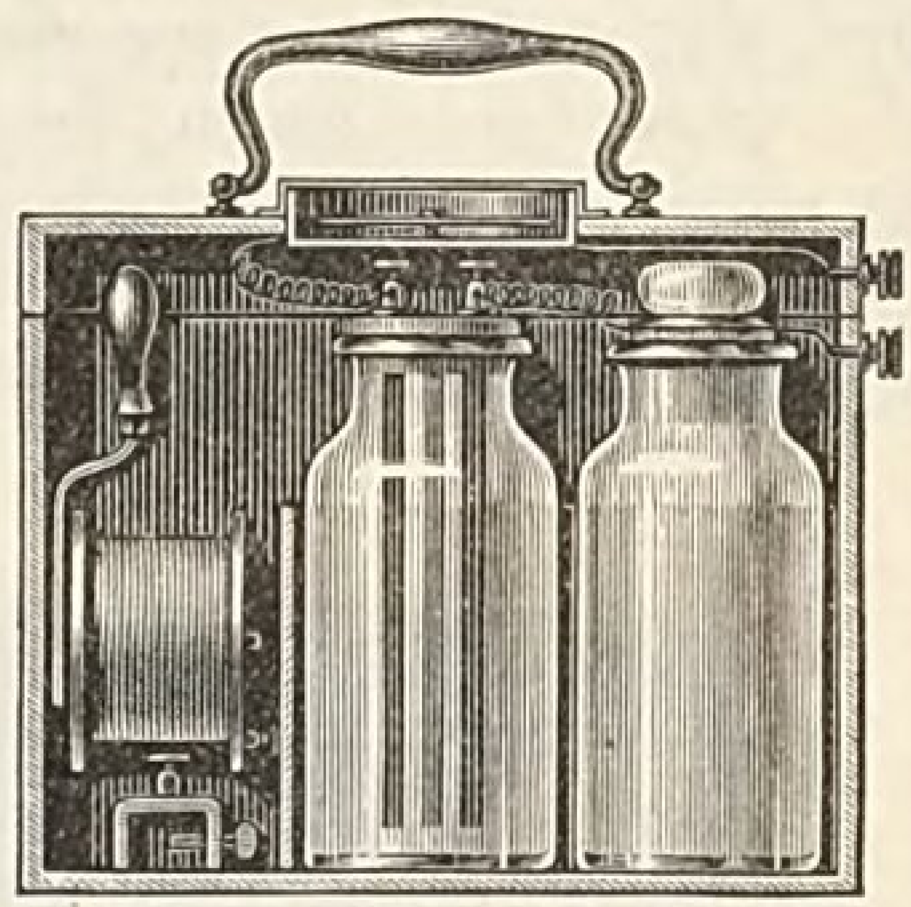


Fig. 268.



Auch werden diese Galvanoskope mit einem Zeiger versehen, der, je nachdem er gestellt wird, eine Widerstandsrolle von 1 bis 20 Siemens'schen Einheiten zum Vergleich in den Strom einschaltet. Neuestens werden zu solchen Prüfungen Telephonbrücken von Hartmann und Braun verwendet. Die Handhabung dieser Apparate kann erst später besprochen werden*).

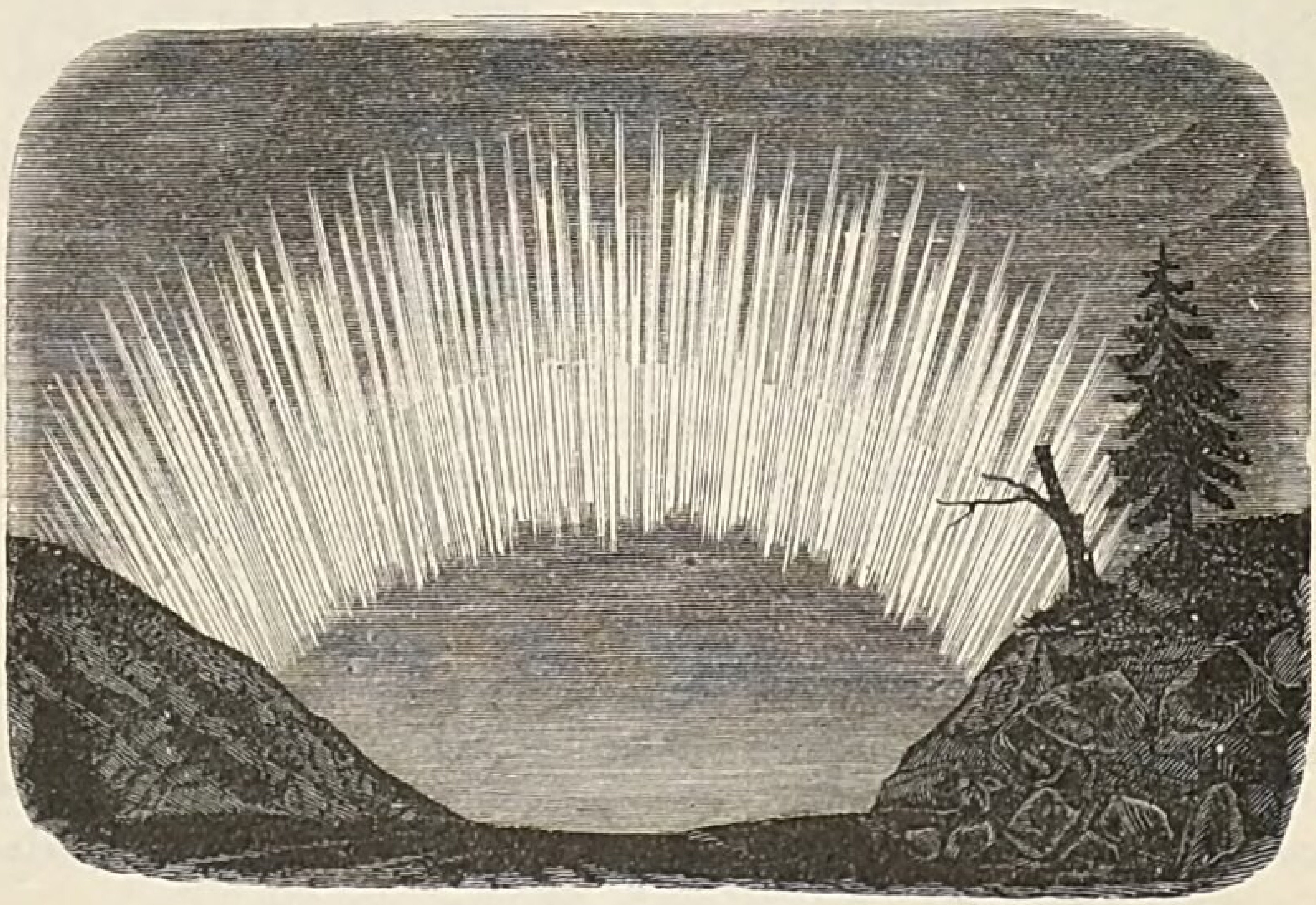
Das Polarlicht. Wenn wir diese prächtige Naturerscheinung an 97
dieser Stelle kurz besprechen, so geschieht es, weil wir die Theorie von De la Rive, nach welcher das Polarlicht oder Nordlicht eine Erscheinung der atmosphärischen Elektricität ist, als die wahrscheinlichste ansehen.

In unseren Gegenden ist das Nordlicht sehr selten, in den nördlichen Theilen von Europa, Asien und Amerika dagegen ist dasselbe eine häufige Erscheinung, welche während des langen Polarwinters das fehlende Tageslicht zum Theil ersetzen muss. Auch auf der südlichen Halbkugel sind von den Seefahrern Polarlichter, dort Südlichter genannt, beobachtet worden und es scheint, dass Nord- und Südlichter häufig gleichzeitig auftreten. Die Erscheinung des Nordlichtes in unseren Breiten ist äusserst wechselvoll und deshalb schwer zu beschreiben. Die letzten ausgezeichneten Nordlichter in Deutschland wurden am 7. Januar 1831, 18. October 1836, 25. October 1870 und am 4. Februar 1872 beobachtet. Eine eingehende Beschreibung derselben sammt Abbildungen findet man in J. Müller's kosmischer Physik, 4. Aufl., S. 820. Wir wollen nur die

*) Nippoldt, Centralbl. f. Elektroch. Bd. 8, S. 159.

charakteristischen Merkmale der Erscheinung hervorheben (Fig. 269). Mit Beginn der Dämmerung zeigt sich der Himmel im Norden eigenthümlich beleuchtet. Ueber einem dunklen bogenförmigen Segment, welches jedoch die helleren Sterne hindurchschimmern lässt, zeigt sich ein weisslicher Bogen. Etwas später erheben sich über diesem Bogen ausgebreitete Massen, welche das Ansehen von gefiederten Wolken haben, die in prächtigen Farben, bald rosenroth, bald grünlichgelb leuchten. Diese Massen bilden einen mehr oder weniger vollständigen Bogen, der sich immer höher gegen das Zenith erhebt. Nach einiger Zeit bildet sich auf diesem Hintergrunde ein System von Strahlen aus, welche durch grösseren Glanz und hellere Farben hervortreten. Diese Strahlen convergiren sämmtlich gegen denselben Punkt am Firmamente, gegen

Fig. 269.



welchen die Inclinationsnadel gerichtet ist, oder genauer, gegen einen um wenige Grade südlicher gelegenen Punkt. Höchst eigenthümlich ist dabei eine undulatorische Bewegung; der Glanz der Strahlen wächst nämlich der Reihe nach von einem Ende des Bogens zum anderen und zwar meist in der Richtung von West nach Ost. Die Strahlen verlängern und verkürzen sich, verblassen oder verschwinden ganz und kehren wieder. Erreichen sie ihre volle Ausbildung, so entsteht die sogenannte K r o n e. Das ist ein förmlicher Kranz convergirender Strahlen, welcher jedoch sehr veränderlich ist und selten länger andauert. Inzwischen färbt sich manchmal der übrige Himmel in rothem, grünem und gelbem Lichte, bis endlich die Erscheinung nach mehrmaligem Wiederkommen gegen Mitternacht erblasst und allmälig ganz verschwindet. Während des Nordlichtes behaupten manche Beobachter ein knisterndes Geräusch wahrgenommen zu haben. Die Magnetnadel ist während und vor Ein-

tritt der Erscheinung sehr unruhig und erleidet insbesondere Ablenkungen nach Westen um mehrere Grade, die Telegraphenleitungen zeigen elektrische Ströme wie bei heftigen Gewittern; meistens mit einer Stromrichtung der positiven Elektricität von Nord gegen Süd. Die Höhe des Nordlichtes wurde früher bis über 100 Meilen angenommen. Neuere Forschungen haben ergeben, dass dasselbe, insbesondere in den Polargegenden, geringere Höhen besitzt und jedenfalls in die Atmosphärenregion hineinreicht. Da ferner das Nordlicht keine scheinbare Bewegung wie die Sterne zeigt, so muss es irdischer Natur sein.

Im hohen Norden wird die Lage der Strahlenbündel eine andere; es erscheint der Lichtbogen oft als ein langes Strahlenband, Fig. 270, welches sich windet und biegt, wie eine Schlange, oder eine vom Winde bewegte Fahne.

Fig. 270.



Unter den neueren Beobachtungen sind insbesondere jene von E. v. Nordenskiöld in der Beringstrasse 1878 bis 1879 angestellten hervorzuheben. Derselbe fand, dass die Erde mit einem beinahe beständigen einfachen, doppelten oder vielfachen Lichtkranze geschmückt sei, dessen innere Kante eine Höhe über Meer von ungefähr 200 km hat, dessen Mittelpunkt etwas unter der Erdoberfläche und etwas nördlich vom magnetischen Pol gelegen ist und welcher mit einem Durchmesser von 2000 km sich in einer Ebene senkrecht gegen den nach dem Mittelpunkte des Lichtkranzes gehenden Erdradius ausbreitet.

Die Theorie des Polarlichtes von De la Rive betrachtet dasselbe als eine elektrische Lichterscheinung im luftverdünnten Raume. Durch die fortwährende Verdunstung des Meerwassers der Aequatorialzone wird der Luft eine bedeutende Menge positiver Elektricität zugeführt, während die Erde negative Elektricität zurückbehält. Die positiv elektrischen Wasserdünste werden durch den Aequatorialstrom in

den höheren Luftschichten den Polen zugeführt und daselbst mit der dabei abgeströmten negativen Elektricität zur Neutralisation gebracht. Diese Elektricitätsentladung bringt in den verdünnten Luftschichten ebenso ein Leuchten derselben hervor, wie innerhalb der Geissler'schen Röhren. Für diese Theorie sprechen die Beobachtungen grosser Höhen der Polarlichter in den Gegenden geringerer Breite, und geringer Höhe in den Polargegenden. Ferner die Berichte über die knisternden Geräusche der niederen Nordlichter, ebenso die Wahrnehmung von starkem Ozongeruch durch den Luftschiffer Paul Rollin, welcher sich im Jahre 1870 in Norwegen in Mitte der leuchtenden Strahlen eines Nordlichtes befand. Ferner stimmen mit De la Rive's Theorie die elektrischen Ströme der von Nord nach Süd laufenden Telegraphenlinien, welche als Nebenleitung für die nach dem Süden strömende positive Elektricität fungiren. Endlich hat De la Rive an einem eigens hierzu construirten Apparate gezeigt, dass die Form der Lichterscheinung mit seiner Theorie in Uebereinstimmung sei. Die Strahlen verlaufen nämlich parallel mit der Richtung der Inclinationsnadel. In Folge perspectivischer Verschiebung müssen dann die Strahlen scheinbar nach demselben Punkte am südlichen Himmel convergiren, wohin das Südende der Inclinationsnadel zeigt. Soll nun aber das Polarlicht denselben Ursprung haben, wie dasjenige, welches bei elektrischer Entladung im luftverdünnten Raume entsteht, so ist zu erwarten, dass das Spectrum des Polarlichtes mit dem Spectrum des elektrischen Funkens in verdünnter Luft übereinstimmen werde. Diese Uebereinstimmung ist aber nicht vorhanden. Das Spectrum des Nordlichtes enthält eine rothe und eine grüne Linie, ausserdem Spuren eines bandförmigen Streifens im blauen Theile. Zöllner hat nun aber durch eine eingehende Untersuchung wahrscheinlich gemacht, dass, wenn die Lichterscheinungen des Polarlichtes elektrischer Natur sind, sie einer so niedrigen Temperatur angehören müssen, dass es unmöglich ist, bei gleicher Temperatur die Spectra glühender Gase in Geissler'schen Röhren zu beobachten. Das Nordlichtspectrum ist also ein Spectrum der verdünnten Luft von ganz anderer Ordnung, als dasjenige der Geissler'schen Röhren.

Es lässt sich nämlich zeigen, dass die Anzahl der glühenden, leuchtenden Lufttheile in der Geissler'schen Röhre ausserordentlich klein ist gegenüber der Anzahl der hinter einander liegenden leuchtenden Lufttheilchen eines Polarlichtes. Erscheinen trotzdem beide gleich hell, so müssen letztere viel weniger hoch erhitzt sein; denn sonst müsste das Polarlicht ausserordentlich viel heller sein, als es wirklich ist. Bei so verschiedener Temperatur des Licht aussendenden Körpers ist aber nicht allein die Intensität des Lichtes, sondern auch die Wellenlänge, d. i. die Farbe, eine verschiedene, wie ja aus anderen Spectralbeobachtungen bekannt ist.

Die elektrische Nordlichttheorie ist also immer noch haltbar und sie gewann an Wahrscheinlichkeit durch den von Lemström 1871

und 1882 bis 1884 geführten experimentellen Nachweis, dass eine specielle Form des Nordlichtes, welche sich in Polargegenden zur Winterszeit durch flammenartige Erscheinungen auf Bergspitzen und Kämmen darstellt, elektrischen Ursprunges sei. Lemström errichtete auf Berggipfeln ein System isolirter, unter sich verbundener Ausströmungsspitzen und führte von diesen eine isolirte Leitung in das Thal, wo dieselbe durch ein Galvanometer und dann in die Erde geführt wurde. Es zeigten sich positive Ströme aus der Atmosphäre zur Erde und gleichzeitig gelblichweisse Lichtsäulen über dem Ausströmungsapparat, welche eine Höhe bis zu 120 m erreichten. In diesem Lichte war mittelst des Spectroskops die für das Nordlicht charakteristische Linie zwischen Fraunhofer's *D* und *E* zu erkennen.

Eine weitere Stütze erhält die Annahme der elektrischen Natur des Nordlichts durch die Ergebnisse neuerer Untersuchungen F. Exner's*) bezüglich der relativen Grösse des Potentialgefälles in verschiedenen geographischen Breiten. Hiernach ist dasselbe in den Polargegenden durchschnittlich 13 mal, im Winter 18 mal so gross wie am Aequator. Es erklärt sich hieraus, dass die von der Grösse dieses Gefälles abhängigen elektrischen Processe im hohen Norden und insbesondere in den Wintermonaten intensiver auftreten werden, als in der heissen Zone und im Sommer.

Eine abweichende Theorie ist jene von G. Zehfuss, welche die Polarlichter als Meteorwolken ansieht, welche von der Sonne beleuchtet werden, und wegen der magnetischen Eigenschaften der meteorischen Staubmassen Einwirkung auf die Magnetnadel und strahlenförmige Anordnung zeigen.

*) Wien. Akad. Ber. XCVI, S. 460 (1887).

Drittes Capitel.

Der galvanische Strom.

98 **Vorbemerkung. Entdeckung des Galvanismus.** Das vorangegangene Capitel war vorzugsweise den Erscheinungen der elektrischen Spannung (statischen Elektricität) gewidmet; da aber schon das Hervorrufen einer solchen Spannung durch Anhäufung der Elektricität, sowie die Entladung derselben mit elektrischen Strömungen verknüpft ist, so ist es nicht möglich, die Strömungserscheinungen von den Spannungserscheinungen getrennt zu halten. Der praktische Grund, warum wir die Gesetze der elektrischen Ströme nicht sofort im Anschluss an die Elektrisirung durch Reibung und durch Influenz besprechen, ist der, dass wir nothwendig vorher eine jener viel mächtigeren Stromquellen kennen lernen müssen, über welche der Physiker verfügt. Diese Stromquellen sind: der galvanische Process, die Thermoelektricität und die Magnetinduction. Es erschiene nun zwar consequenter, zuerst alle diese Stromquellen kennen zu lehren und dann erst die Wirkungen des Stromes und dessen Gesetze zu erörtern. Wir ziehen es aber vor, und zwar wieder insbesondere aus praktischen Gründen, die in den bisherigen Auflagen angewendete Anordnung beizubehalten und wollen daher in diesem Capitel den galvanischen Strom und im Anschluss daran die wichtigsten Gesetze des elektrischen Stromes überhaupt besprechen, da wir diese in den folgenden Capiteln, welche den übrigen Stromquellen gewidmet sind, als bekannt voraussetzen müssen. Diese Anordnung ist aber auch vom historischen Standpunkte aus zu rechtfertigen, da der galvanische Strom der erste war, an dem die Wirkungen und Gesetze der elektrischen Ströme entdeckt und erforscht worden waren.

Die Geschichte des Galvanismus ist eine Geschichte von Irrthümern. Wenn dies auch im Allgemeinen von jedem Zweige der Wissenschaft gesagt werden kann, so ist es doch bei der Entwickelung unserer An-

sichten über die galvanischen Erscheinungen in hervorragendem Grade der Fall. Der Zufall wollte es, dass die Entdeckung des galvanischen Stromes von einem Experimente seinen Ausgang nahm, welches von vornherein durch seine Complicirtheit wenig geeignet war, klare Erkenntniss zu vermitteln, welches vielmehr durch seine Verquickung mit dunkeln physiologischen Vorgängen die Gefahr langwieriger Verirrungen in sich barg. Aber selbst dann, nachdem durch Alexander Volta's Geist und Geschick der Grundversuch aus dem physiologischen Labyrinth in das offene Feld rein physikalischer Forschung hervorgezogen worden war, blieb es den Physikern bis zum heutigen Tage versagt, in den Besitz einer allgemein als richtig anerkannten Erklärung dieses Grundversuches zu gelangen. Während längst die Gesetze des elektrischen Stromes entwickelt und seine Wirkungen zu den staunenswerthesten Erfindungen verwerthet sind, ist noch heute der alte Streit zwischen den Anhängern der Contacttheorie und ihren Gegnern nicht geschlichtet und gehen zum Theil selbst die Behauptungen über die Richtigkeit von Thatsachen aus einander.

Bis hierüber eine Klärung stattgefunden hat, bleibt es die Aufgabe eines Lehrbuches, die zweifellos anerkannten Thatsachen mitzutheilen und an geeigneter Stelle über die abweichenden Ansichten Bericht zu erstatten.

Schon am 15. November 1756 veröffentlichte Caldani in Bologna eine Abhandlung über die Einwirkung der Elektricität auf frisch getödtete Frösche, welche hierdurch in Zuckungen geriethen. Im Jahre 1760 berichtete Sulzer in der Berliner Akademie über eine eigenthümliche Geschmackserscheinung, welche man wahrnimmt, wenn man zwei verschiedene sich am Rande berührende Metalle an die Zunge bringt. Diese beiden Beobachtungen blieben lange unbeachtet. Im Jahre 1789 beobachtete die Frau des Professors der Medicin Ludwig Galvani in Bologna neuerdings, dass ein frisch getödteter Frosch in der Nähe einer Elektrisirmaschine in Zuckungen gerieth, so oft aus dem Conductor Funken gezogen wurden. Galvani verfolgte diese Erscheinung weiter. Ohne die richtige Erklärung zu finden, wollte er versuchen, ob der Froschschenkel solche Zuckungen nicht etwa auch unter dem Einfluss der atmosphärischen Elektricität mache und hängte zu diesem Zweck die Schenkel frisch getödteter Frösche mittelst metallener Haken an einem eisernen Balcongeländer auf. In der That beobachtete er an solchen Präparaten Zuckungen, deren nähere Untersuchung eine Reihe der wichtigsten Entdeckungen zur Folge hatte.

Die Froschschenkel, an welchen Galvani seine Beobachtungen machte, waren in der Weise präparirt, wie man in Fig. 271 (a. f. S.) sieht. Nachdem das eben getödtete Thier durchgeschnitten ist, wird von dem unteren Theile rasch die Haut abgezogen, und indem man die Spitze der Scheere unter die beiden Schenkelnerven bringt, welche auf jeder Seite der Wirbelsäule als weisse Fäden erscheinen, nimmt man mit zwei

Schnitten die zwei oder drei untersten Rückenwirbel weg, so dass die Schenkelnerven bloss liegen und die unteren Glieder nur durch sie mit den oberen Wirbelknochen zusammenhängen. Galvani hatte einen kupfernen Haken in der Wirbelsäule befestigt und beobachtete jedesmal eine Zuckung der Schenkel, so oft sie mit dem eisernen Geländer in Berührung kamen. Diese Wirkungen nehmen meistens schnell ab, so dass man gewöhnlich 20 bis 30 Minuten nach dem Tode des Thieres nur noch sehr schwache Zuckungen der Muskeln wahrnehmen kann.

Man kann den galvanischen Grundversuch sehr bequem mit Hülfe der Vorrichtung Fig. 272 anstellen. Ein Stück Kupferblech *b* ist durch

Fig. 271.

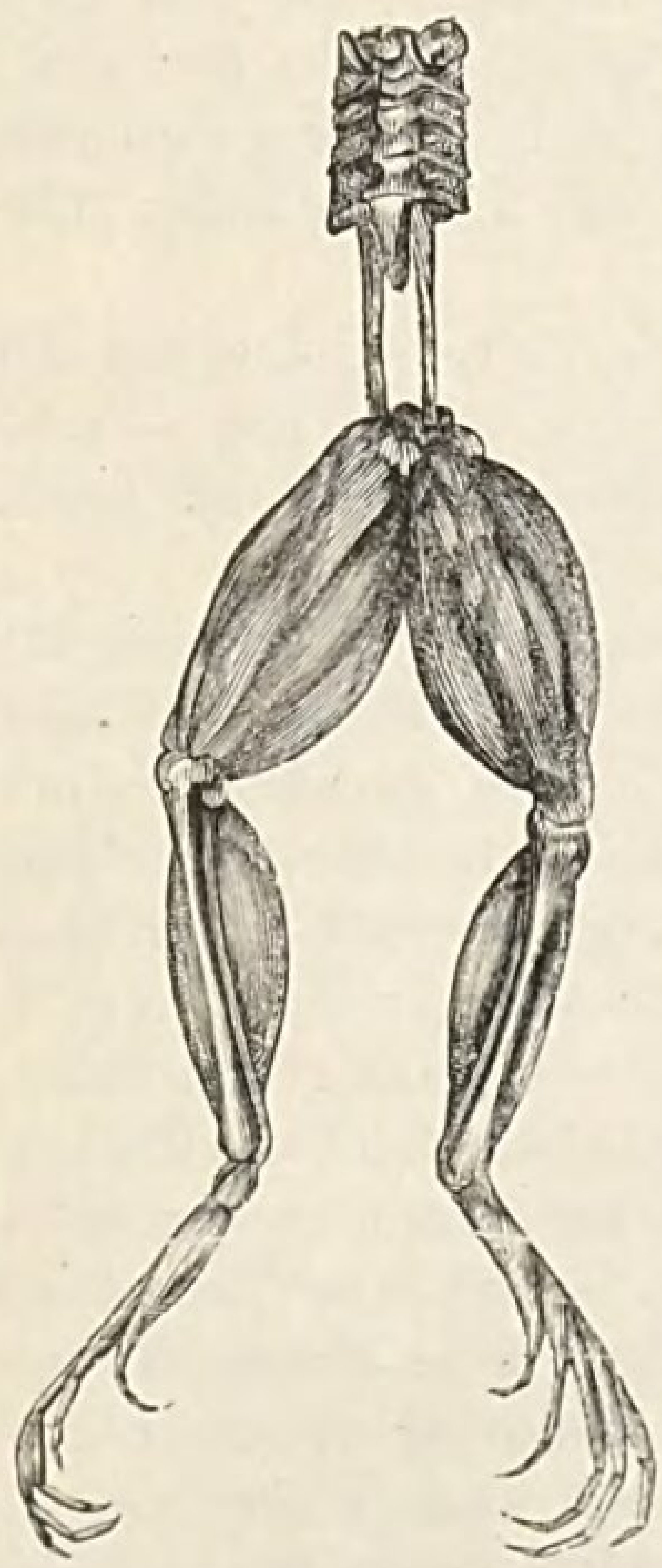
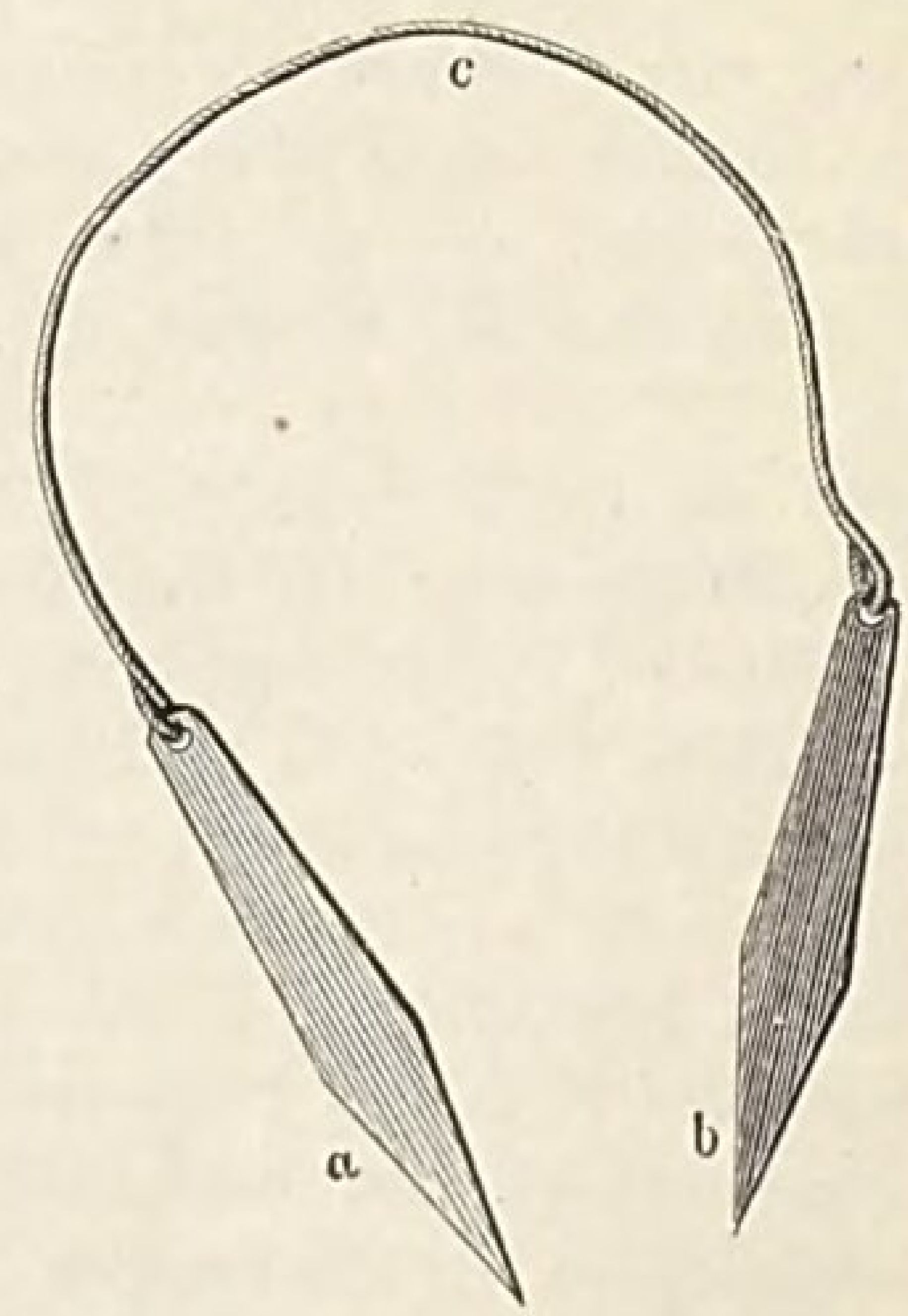


Fig. 272.



einen Kupferdraht *c* mit dem Zinkblech *a* verbunden. Um stets metallische Verbindung zu erhalten, kann man den Kupferdraht an die beiden Bleche anlöthen. — Berührt man nun mit einem dieser Bleche die Schenkel, mit dem anderen die Nerven, so tritt alsbald eine Zuckung der Schenkel ein.

Indem Galvani genau diese Umstände angab, unter welchen die Erscheinung erfolgt, hat er sie wohl von den unbestimmten convulsivischen Bewegungen unterschieden, welche man an Insecten, Reptilien und Fischen oft noch lange nach ihrer Verstümmelung beobachtet. Galvani, welcher sehr für die Idee eingenommen war, dass es eine besondere Nerven- oder Lebensflüssigkeit gebe, stand nicht an, von dem

Phänomen eine Erklärung zu geben, welche mit seinen Lieblingstheorien übereinstimmte. Die Zuckungen der Froschschenkel, sagte er, werden durch eine Flüssigkeit hervorgebracht, welche vermittelst einer äusseren Leitung von den Nerven zu den Muskeln überströmt; diese Flüssigkeit befindet sich in den Nerven, sie geht von diesen durch den metallischen Leitungsbogen auf die Muskeln über. Diese neue Flüssigkeit wurde die galvanische Flüssigkeit genannt, und man dachte sich die organischen Körper in Beziehung auf die Flüssigkeit ungefähr wie eine Leydener Flasche, deren Belegung einerseits die Nerven, andererseits die Muskeln sind.

Der Lärm dieser Entdeckung verbreitete sich bald über Deutschland, Frankreich und England; überall beeilte man sich, die Versuche zu wiederholen und abzuändern; das Phänomen selbst erregte grosses Erstaunen, aber die Hoffnung, in den organischen Körpern eine feine Flüssigkeit, ein Lebensprincip, aufzufinden, steigerte die Neugierde der Gelehrten noch mehr. Ausserdem erschienen diese Ideen gerade in einer Zeit grosser Entdeckungen und Reformen, alle Geister waren in Bewegung und schienen durch den Reiz der Neuheit hingerissen.

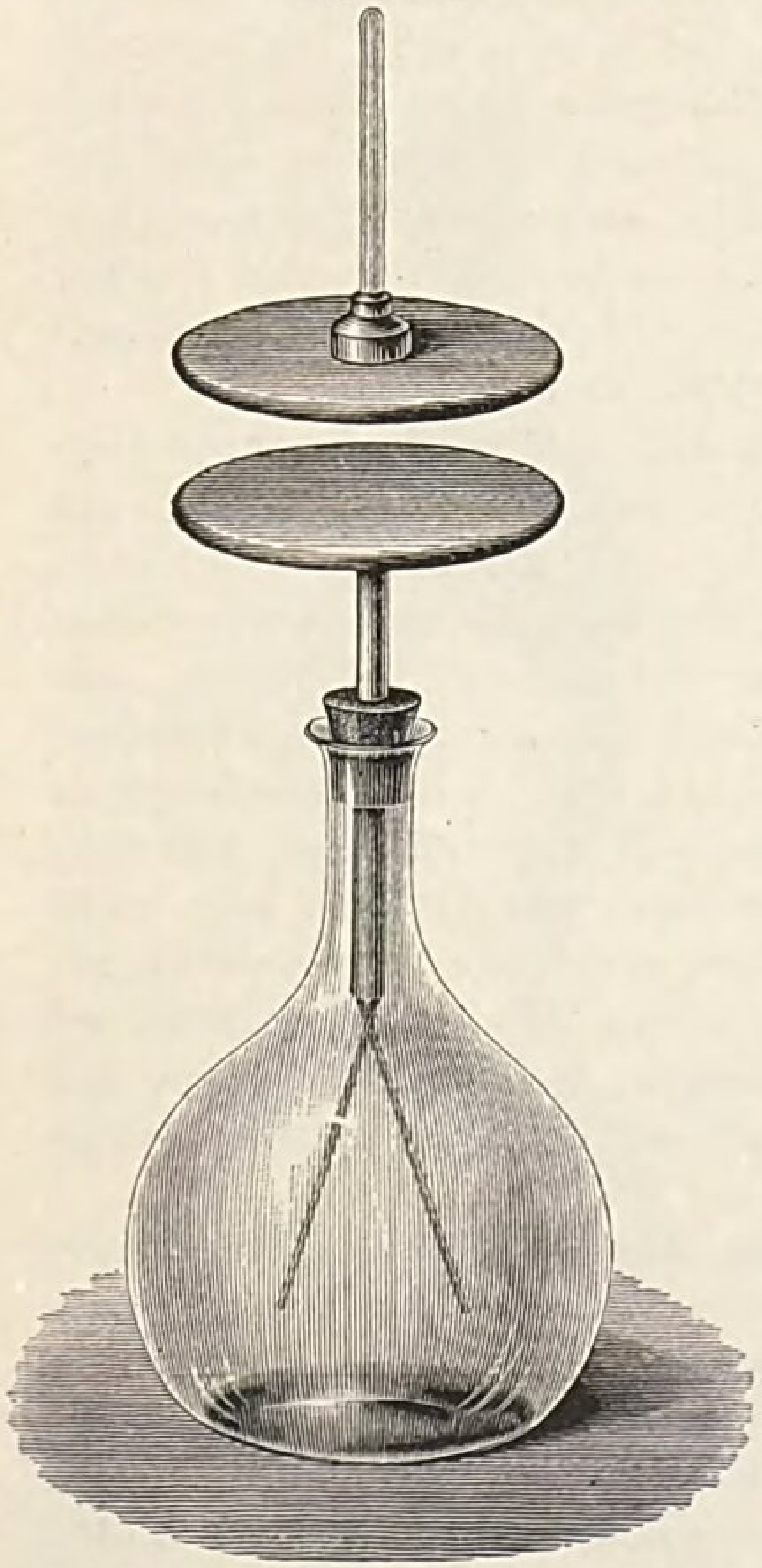
Die ganze Richtung, in welcher man anfänglich die neue Entdeckung zu verfolgen suchte, drohte aber auf Irrwege zu führen, aus denen man vielleicht noch lange keinen Ausweg gefunden haben würde, wenn nicht bald ein Mann von klarem Geiste diesen Versuchen eine andere Richtung gegeben hätte. Dieser Mann war Alexander Volta, welcher durch seine Untersuchungen über den Elektrophor und den Condensator schon eine gute Schule durchgemacht hatte. Volta, Professor zu Pavia, wiederholte Galvani's Versuche mit unermüdlicher Aufmerksamkeit und fand bald, dass ein zum Gelingen des Versuchs sehr wichtiger Umstand bis dahin ganz übersehen oder doch nicht gehörig gewürdigt worden war. Um nämlich eine starke Wirkung zu erhalten, ist es durchaus nöthig, dass der Leitungsbogen, welcher die Nerven und Muskeln verbindet, aus zwei verschiedenen Metallen besteht, welche mit einander in Berührung sind.

Volta schloss aus seinen Versuchen, dass der Froschschenkel nicht wie eine Leydener Flasche zu betrachten sei; dass das hier wirkende Agens weder in den Nerven, noch in den Muskeln, sondern durch den Contact der beiden Metalle entwickelt werde und dass es mit der gewöhnlichen Elektricität vollkommen identisch sei. Es entspann sich nun ein langer, hartnäckiger wissenschaftlicher Streit zwischen Volta und Galvani, der deshalb so sehr interessant wurde, weil der Sieg sich bald dahin, bald dorthin zu neigen schien, bis er endlich Volta zufiel, wobei jedoch zu beachten ist, dass lange nach Galvani's Tode auch dessen Ansicht über eine Elektricitätsquelle innerhalb des Froschkörpers gerechtfertigt wurde. Man lese hierüber die ausgezeichnete Darstellung Du Bois-Reymond's im 1. Bande seiner Untersuchungen über die thierische Elektricität.

Volta's Lehre von der Elektricitätsentwickelung durch die Berührung verschiedener Metalle wurde längere Zeit allgemein als die richtige angenommen, bis eine genauere Untersuchung der chemischen Wirkungen des elektrischen Stromes und der Rolle, welche die Flüssigkeiten in der alsbald zu besprechenden Volta'schen Säule spielen, die meisten Physiker veranlasste, die Volta'sche Contacttheorie entweder gänzlich aufzugeben oder dieselbe doch wesentlich zu modificiren.

99 **Der Volta'sche Fundamentalversuch.** Die wichtigste Entdeckung Volta's war die, dass ohne Zuhülfenahme eines Froschpräparates bei der Berührung von heterogenen Metallen elektrische Erscheinungen wahrgenommen werden.

Fig. 273.



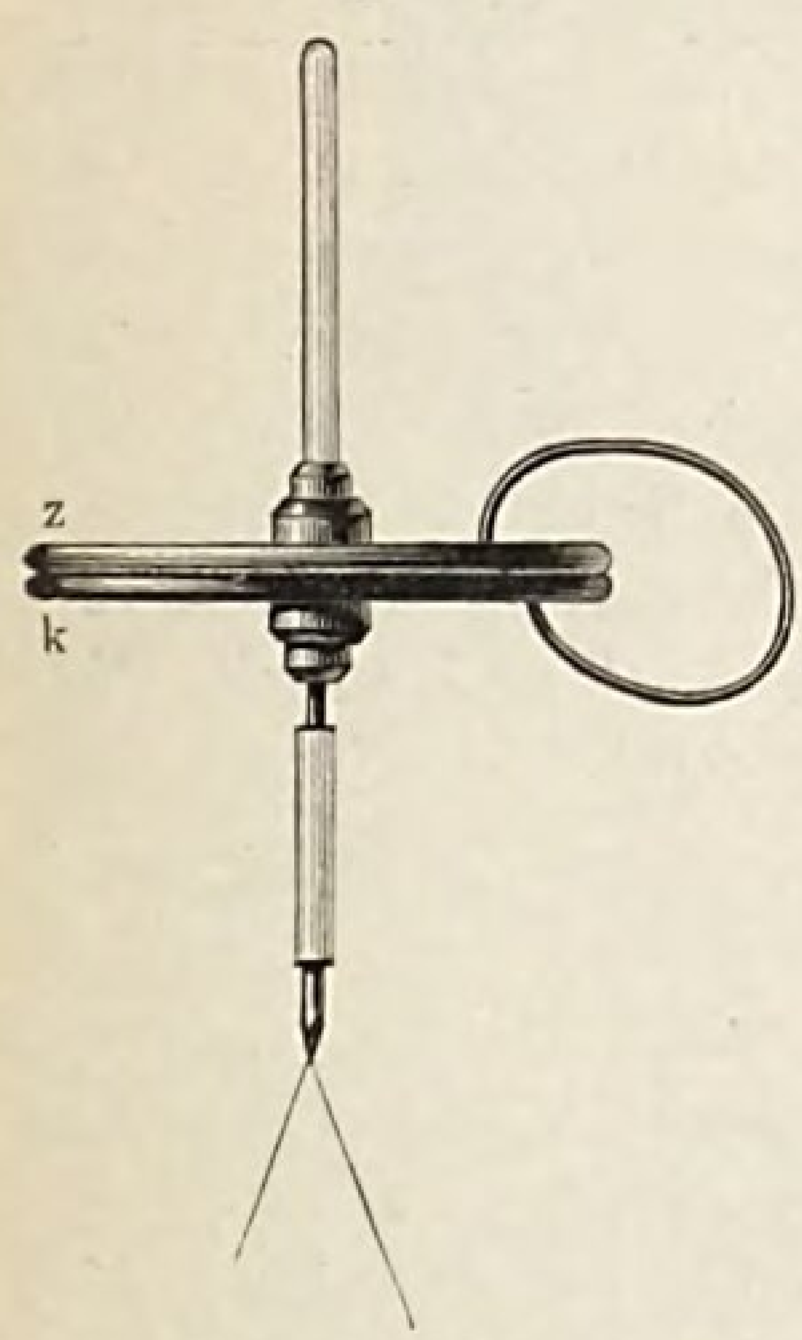
Soll die Entstehung von Elektricität bei der Berührung verschiedener Metalle auf einwurfsfreie Weise nachgewiesen werden, so muss man das Experiment so anstellen, dass in keiner Weise eine Berührung mit Flüssigkeiten, ja nicht einmal mit der feuchten Oberfläche der Hand des Experimentators stattfindet. Wir wollen die Versuche der Reihe nach numeriren, um uns bequemer darauf berufen zu können.

1. Versuch. Auf ein Goldblattelektroskop von der in Figur 273 dargestellten Form wird eine nicht gefirnisste kupferne Platte, ähnlich der eines Condensators, aufgeschraubt. Man überzeugt sich zunächst, dass durch die Berührung der Goldblättchen mit dem Kupferdraht, an dem sie befestigt sind, keine merkliche Elektricitätsmenge entwickelt wird, da keine Divergenz erfolgt. (Wollte man in dieser Hinsicht noch sicherer gehen, so müsste man die Blättchen, den Stiel und die Platte aus demselben Metall herstellen; wir werden später zeigen, dass diese Vorsicht unnöthig ist.) Setzt man dann auf die wohl gereinigte Kupferplatte eine ebensolche Zinkplatte, die man an einem isolirenden Glasstiele angefasst hat, so bemerkt man noch immer keine Divergenz der Blättchen.

Hebt man nun aber die Zinkplatte isolirt in paralleler Lage ab, so wird man, falls das Elektroskop genügend empfindlich ist, eine sehr schwache Divergenz der Blättchen beobachten, welche durch vorsichtige Annäherung einer geriebenen Glasstange vermindert wird, also durch negative Elektricität hervorgerufen wurde.

Kehrt man den Versuch in der Weise um, dass man die Zinkplatte mit dem Elektroskop verbindet und eine isolirte Kupferplatte aufsetzt und abhebt, so zeigen die divergirenden Blättchen positive Elektricität. Dieser Versuch misslingt leicht wegen nicht genügender Empfindlichkeit des Elektroskops. Sicherer gelingt derselbe mit einem Elektroskop anderer Einrichtung, bei welchem ein einziges Goldblättchen in der Mitte zwischen zwei entgegengesetzt elektrisirten Metallplättchen herabhängt. Es wird dann das Blättchen nach der einen oder anderen Seite hingezogen. Wir werden später ein solches Instrument kennen lernen.

Fig. 274.



2. Versuch. Wir bedienen uns desselben Apparates, heben aber die obere Platte nicht parallel in die Höhe, sondern ziehen sie seitwärts ab oder wir berühren nur einen Punkt der einen Platte mit einem solchen der anderen, kurz, verfahren so, dass zwar Berührung stattfindet, aber keine merkliche Condensatorwirkung eintreten kann. Es erfolgt keine merkliche Divergenz der Blättchen.

3. Versuch. Der Apparat ist der frühere, nur sind die Metallplatten an der zugekehrten Seite gefirnisst, so dass daselbst kein Contact stattfindet. Man setzt die Zinkplatte auf die mit dem Elektroskop verbundene Kupferplatte und berührt nun die äusseren nicht gefirnissten Stellen der beiden Platten gleichzeitig mit den Enden eines Kupferdrahtes (Fig. 274), den man isolirt halten kann. Nach dem Entfernen des Drahtes und dem Abheben der Zinkplatte zeigt das Elektroskop eine gleich starke negative Ladung, wie beim ersten Versuche, woraus wir schliessen, dass es auf die Grösse der berührenden Flächen nicht ankommt. Damit ist aber nicht gesagt, dass auch die Grösse der condensirenden Flächen ohne Einfluss sei, der Versuch 2 hat ja bereits gezeigt, dass keine merkliche Wirkung eintritt, wenn die sich gegenüberstehenden Flächen nicht hinlänglich gross sind. Wir schliessen daraus, dass beim Versuche 1 nicht die grosse Anzahl der Berührungspunkte, sondern nur die condensirende Wirkung der Platten den Erfolg bedingt.

Wichtig ist noch folgende Modification des Versuches: Nimmt man statt des Kupferdrahtes einen Draht aus Zink oder irgend einem anderen Metall, oder eine Kette aus irgend welchen Metallstücken zu-

sammengesetzt, so erfolgt stets ganz derselbe Ausschlag des Elektroskops, so lange die Condensatorplatten dieselben bleiben. Diese Thatsache werden wir später deuten.

4. Versuch. Derselbe ist dazu bestimmt, den Einwurf zu widerlegen, dass bei den bisherigen Versuchen die nicht ganz ausgeschlossene Reibung oder der Stoss der heterogenen Metalle die Ursache der Elektricitätsentwickelung sei.

Man setzt die isolirte, gefirnisste Zinkplatte auf die mit dem Elektroskop verbundene, ebenfalls gefirnisste Kupferplatte und berührt nun die nicht gefirnissten äusseren Flächen mit den Enden eines gekrümmten Blechstreifens, welcher aus einem Stück Zinkblech und einem Stück Kupferblech zusammengesetzt ist. Der Blechstreifen wird so angelegt, dass das Zinkende mit der Zinkplatte, das Kupferende mit der Kupferplatte in Berührung kommt. Um die Evidenz der aus diesem Experiment zu ziehenden Schlüsse nicht zu stören, wird man den Blechstreifen aus den beiden Metallstücken nicht durch Löthen mit einem dritten Metall, sondern durch Nieten oder Zusammenbiegen vereinigen und an einem isolirenden Halter anfassen. Doch sind diese Maassregeln zum Erfolg nicht erforderlich. Es zeigt sich nach Entfernung des Streifens und Abheben der Platte ganz dieselbe Elektrisirung, wie beim Versuche 1 oder 3. Da nun diesmal die Berührung der heterogenen Metalle nicht mit Reibung verknüpft ist, und andererseits die schwache Reibung von Kupfer mit Kupfer, und Zink mit Zink keine Elektricität erzeugen kann, so ist die Erklärung durch Reibung oder Stoss ausgeschlossen.

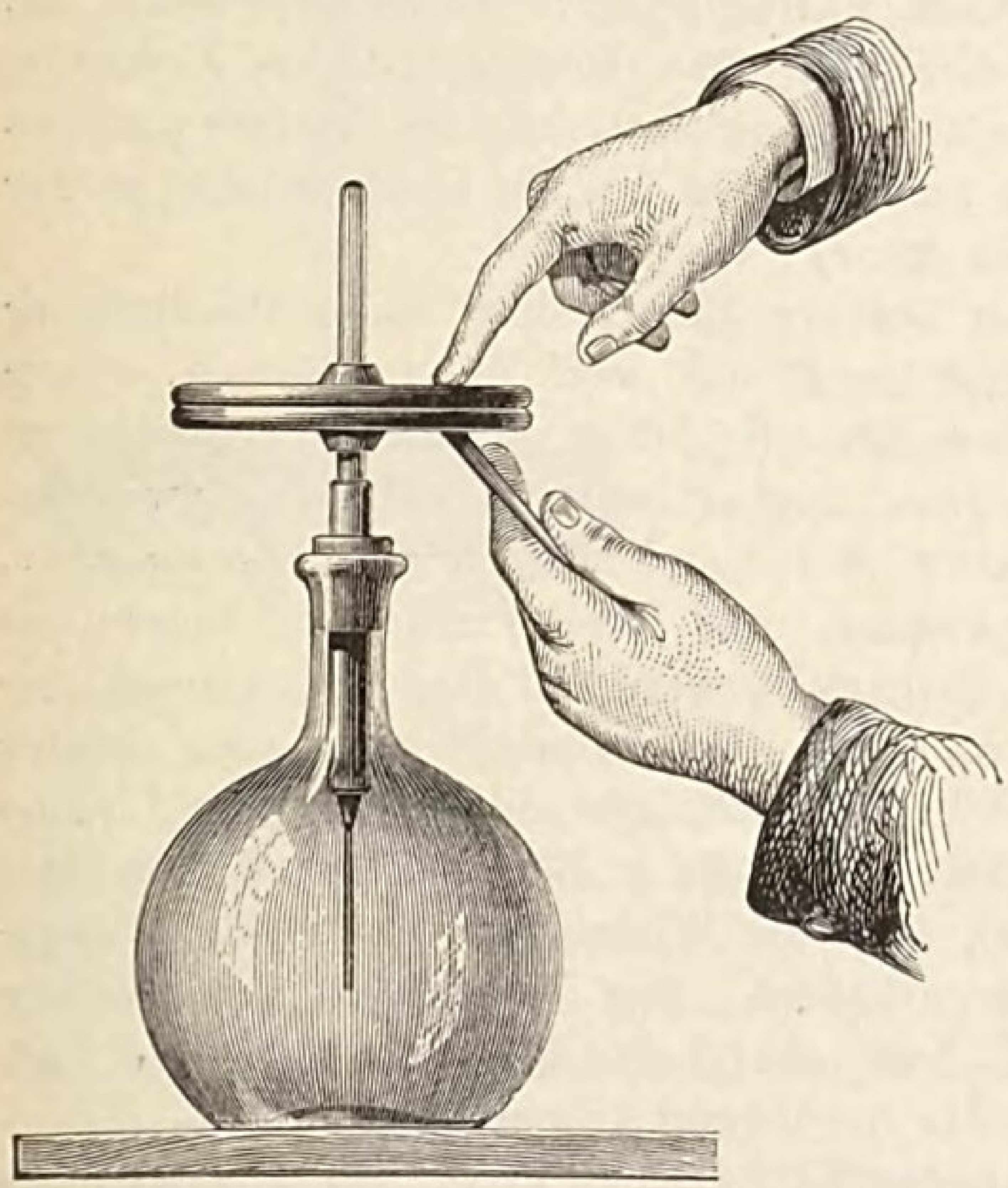
5. Versuch. Um stärkere Divergenz der Goldblättchen zu erreichen oder auch an einem minder feinen Elektroskope die Berührungselektricität nachzuweisen, verfährt man folgendermaassen:

Die gefirnisste Zinkplatte wird auf die gefirnisste Kupferplatte des Elektroskops aufgesetzt und nun ein zweites nicht gefirnisstes Plattenpaar aus Zink und Kupfer an isolirenden Handgriffen gefasst und mit den blanken Flächen an einander gelegt und wieder getrennt. Hierauf werden diese beiden Platten an die gleichartigen Platten des Condensators an den nicht gefirnissten Stellen angelegt und nun dieser Vorgang der Zusammenlegung, Trennung und Anlegung an die Condensatorplatten mehrmals, z. B. 20mal, wiederholt. Endlich wird die obere Condensatorplatte abgehoben, worauf ein viel stärkerer Ausschlag an den Goldblättchen als bei den früheren Versuchen beobachtet wird. Dabei zeigt sich stets die Zinkplatte positiv, die Kupferplatte negativ geladen. War z. B. die Kupferplatte die untere, so divergiren die Blättchen beim Abheben der Zinkplatte mit negativer Elektricität; hat man dann diese durch Verbindung mit der Erde abgeleitet, so bringt nun die wieder aufgesetzte oder mit der unteren Platte in Verbindung gesetzte Zinkplatte einen neuerlichen Ausschlag positiver Elektricität hervor.

6. Versuch. Der nun folgende Versuch schliesst zwar die Berührung mit der Hand des Beobachters, also die Intervention der Feuchtigkeit der Haut, nicht aus, ist aber dennoch derartig angeordnet, dass aus diesem Umstande kein stichhaltiger Einwurf gegen die Beweiskraft des Versuches abgeleitet werden kann.

Das Elektroskop trage wiederum eine gefirnisste Kupferplatte, auf welche die ebenfalls gefirnisste Zinkplatte gesetzt wird. Nun berührt man die Kupferplatte an der unteren nicht gefirnissten Seite mit einem in der einen Hand gehaltenen Zinkstücke und zugleich die obere Zinkplatte mit einem Finger der anderen Hand (Fig. 275). Entfernt man dann das Zinkstück und hebt die Zinkplatte ab, so zeigt das Elektroskop negative Elektricität. Dieselbe Wirkung erzielt man, wenn man die obere (Zink-) Platte mittelst eines in der Hand gehaltenen Kupferstäbchens und zugleich die untere (Kupfer-) Platte mit der Hand berührt.

Fig. 275.



Die Erklärung ist einfach folgende:

Während der Berührungen ist bei diesen beiden Versuchsanordnungen die Aufeinanderfolge der Körper durch nachstehende Schemata gegeben:

I.

Hand,
Zinkplatte,
Firniss,
Kupferplatte,
Zinkstange,
Hand.

II.

Hand,
Kupferstange,
Zinkplatte,
Firniss,
Kupferplatte,
Hand.

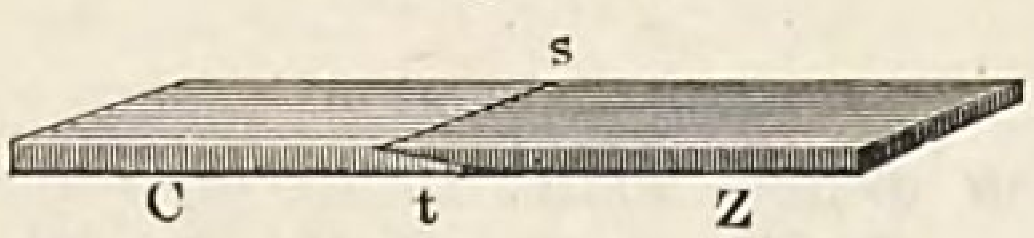
Betrachten wir zunächst die Anordnung I.:

Durch Berührung des Zinks mit der Feuchtigkeit der Handoberfläche erhält dasselbe, wie wir später erfahren werden, ein negatives Potential. Wäre zwischen Zink und Kupfer keine Contactwirkung vorhanden, so würde bei der in Fig. 275 abgebildeten Berührung nicht bloss die obere Zinkplatte, sondern auch die Kupferplatte und durch diese das Elektroskop auf dasselbe negative Potential gebracht werden*).

*) Dass man hierdurch keine Wirkung auf das Elektroskop erzielt, wird später dadurch erklärt werden, dass letzteres durch die vorausgegangene Ent-

Eine Potentialdifferenz zwischen beiden Seiten der Firnissschicht kann hierdurch allein also nicht entstehen; ebenso wenig könnte durch das darauf folgende Abheben der oberen Platte das so erzeugte Potential gesteigert werden, da hierbei die Capacität nur zunehmen könnte. Tritt demnach beim Abheben der Platte eine Divergenz der Blättchen ein, so kann dies nur durch eine Potentialdifferenz der Platten erklärt werden, da beim Vorhandensein einer solchen Condensatorwirkung stattfindet und durch Abheben die Capacität vermindert wird. Diese Potentialdifferenz ist demnach auf die Contactwirkung zwischen Kupferplatte und Zinkstück zurückzuführen. Analog ist die Erklärung für die Anordnung II.

Fig. 276.



Will man auch bei diesen Versuchen die Möglichkeit einer Reibung zwischen den heterogenen Metallen ausschliessen, so bedient man sich der schon von Volta angewendeten Doppelplatte, Fig. 276, welche aus einer Zink- und einer Kupferplatte zusammengesetzt ist. Man fasst dann bei der Anordnung I. diese Doppelplatte am Zinkende, bei der Anordnung II. am Kupferende, so dass stets am Condensator nur gleiche Metalle in Berührung kommen und nur die Contactstelle in der Mitte der Doppelplatte wirken kann.

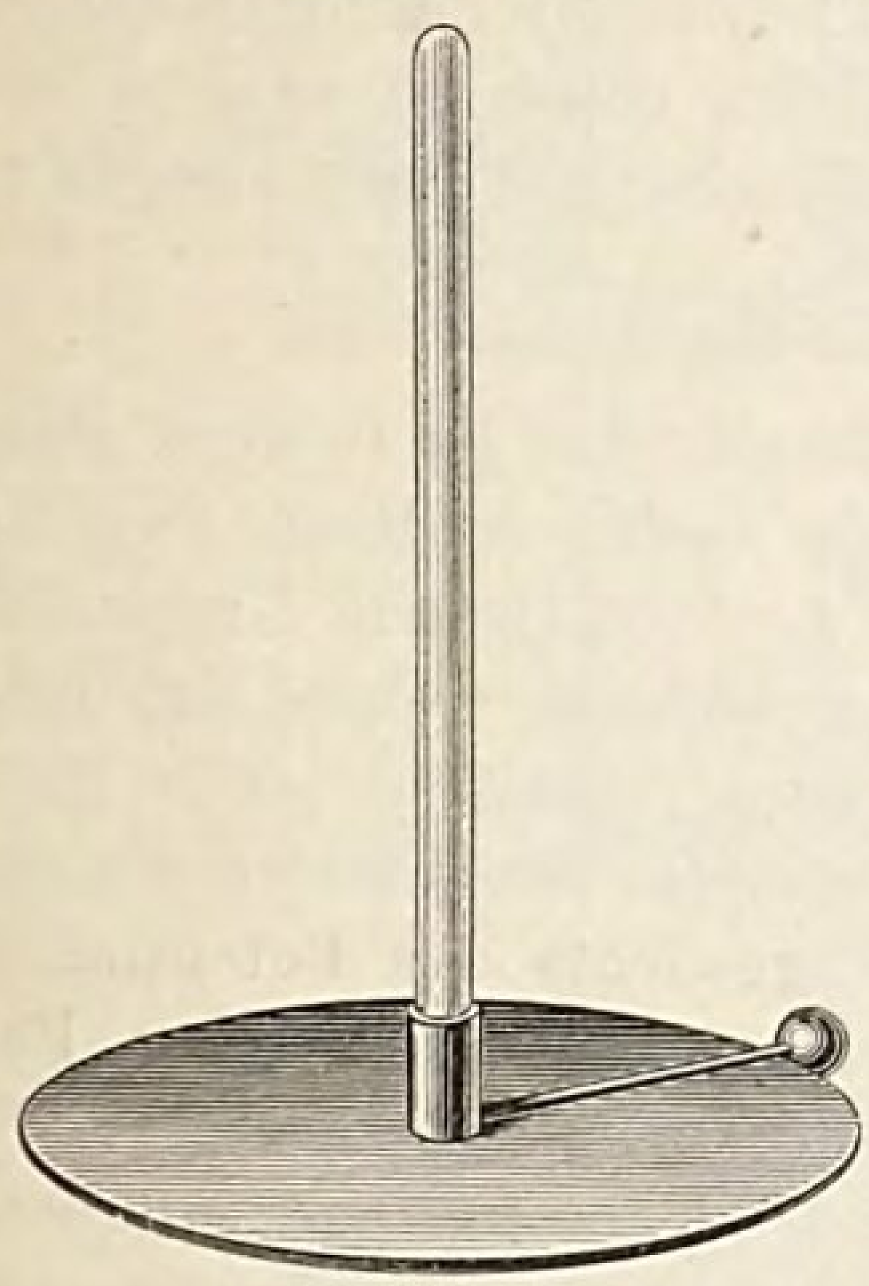
7. Versuch. Setzt man auf ein Elektroskop einen Condensator mit Platten aus gleichem Metall, z. B. mit zwei Messingplatten, so gelingen die Versuche 3 und 5 nicht. Es ist in diesem Falle überhaupt nicht möglich, irgend eine rein metallische Verbindung zwischen den ungefirnissten Aussenseiten der Condensatorflächen herzustellen, welche die Versuche gelingen lässt, mag diese Verbindung aus einem oder aus mehreren Metallen hergestellt werden. Dagegen gelingt der Versuch 6 auch dann, wenn man beide Platten aus Messing oder Kupfer herstellt. Aber in diesem Falle sind mit der ableitenden Hand oberhalb und unterhalb nicht dieselben Metalle in Berührung und man darf daher nicht mehr annehmen, dass die Wirkungen dieser Berührungsflächen oben und unten sich aufheben. Der Versuch 6, mit gleichen Condensatorplatten angestellt, hat daher keine Beweiskraft für die Entstehung von Elektricität bei der Berührung zweier Metalle.

Nach v. Beetz kann man den Volta'schen Fundamentalversuch als Vorlesungsexperiment mit Hülfe des von ihm construirten Bifilarelektroskops, §. 47, Fig. 105, auf folgende Weise anstellen: Auf einen ebenen, trockenen, staubfreien Tisch wird eine kupferne Condensatorplatte mit Glasgriff (Fig. 277) hingestellt. Diese Platte hat auf der Rückseite eine kleine kupferne Kugel und auf der Unterseite derselben sind drei Tröpfchen Schellack aufgetragen, welche dieselbe von der Tischfläche

ladung durch Fingerberührung bereits ein ebenso grosses Potential erhalten hat, welches aber zu gering ist, um eine Divergenz zu bewirken.

isoliren. Letztere vertritt die zweite Condensatorplatte, da sie hinlänglich gut leitet, um die Influenzelektricität zweiter Art abzuführen. Man schraubt nun eine Zinkplatte von ihrem isolirenden Handgriffe ab und auf einer auf dem Tisch liegenden schweren Bleiplatte fest, fasst eine Kupferplatte an ihrem isolirenden Stiele, setzt sie wiederholt auf die Zinkplatte und berührt jedesmal damit die auf dem Tische liegende Condensatorplatte. Nach 10- bis 15 maliger Wiederholung wird dann die letztere vorsichtig parallel abgehoben und dem vorher negativ geladenen Hollundermarkkügelchen genähert und dabei eine kräftige, weithin sichtbare Abstossung erzielt *). Derselbe Apparat kann jedoch, wenn Alles in recht gutem Zustande ist, noch so benutzt werden, dass man die Kupfer- und Zinkplatte ganz isolirt zur Berührung bringt und unmittelbar darauf von beiden Seiten dem vorher elektrisirten Hollundermarkkügelchen nähert. War dasselbe positiv geladen, so wird es von der Zinkplatte abgestossen und von der Kupferplatte angezogen. (Edelmann: Neuere Apparate etc. Stuttgart 1879, S. 74.)

Fig. 277.



Eine sehr einfache Methode, die Potentialdifferenz zwischen zwei mit einander in Berührung stehenden Metallen während ihrer Berührung nachzuweisen, ist von W. Thomson angegeben worden. Man ersetzt die messingenen Quadranten des Quadrantenelektrometers (§. 71) durch solche, welche abwechselnd aus Zink und Kupfer bestehen. Je zwei benachbarte dieser Quadranten, über denen das Aluminiumblatt schwebt, werden metallisch verbunden. Wird nun die Aluminiumplatte abwechselnd auf ein positives und negatives Potential gebracht, so ändert sie jedesmal ihre Lage, da sie im ersten Falle gegen das Kupfer angezogen und vom Zink abgestossen wird, im zweiten Falle die entgegengesetzten Einwirkungen erfährt.

In anderer Weise hat W. Hallwachs **) das Quadrantenelektrometer zum Nachweise und zur Messung von Contactpotentialdifferenzen benutzt. Sind die Metallhülle, die Quadranten und die Nadel eines solchen Instruments aus demselben Metalle und unter sich, sowie mit einer Ableitung zur Erde verbunden, so besitzen alle diese Theile dasselbe Potential, welches durch den Contact ihres Metalls mit der Erdleitung entsteht. Dagegen haben weder Nadel noch Quadranten eine Ladung,

*) Hierbei kommt, wie uns scheint, wohl die Potentialdifferenz Blei/Kupfer und nicht Zink/Kupfer zur Wirkung.

**) Elektrometrische Untersuchungen, Wiedem. Ann. 29, S. 1 (1886).

da sie von der Metallhülle allseitig umschlossen sind (§. 56). Fügt man nun der Nadel und einem der übers Eck stehenden Quadrantenpaare noch ein gleiches Potential hinzu, indem man in ihre Verbindung zur Erdleitung eine galvanische Kette einschaltet, so muss die Nadel eine Ablenkung erleiden, welche aber beim Polwechsel der Kette nicht geändert wird. Ist jedoch das Metall der Nadel ein von dem der Quadranten verschiedenes, ist sie z. B. aus Aluminium, während die Quadranten und die Hülle aus Messing bestehen, so hat die Nadel von Anfang an ein von dem Potential der Hülle und der Quadranten abweichendes Potential, also auch eine Ladung. Beim Polwechsel können dann die Ausschläge nicht gleich bleiben, da die Gesammtladung der Nadel das eine Mal der Summe, das andere Mal der Differenz ihrer Einzelladungen entspricht, während der Werth der Ladung des Quadrantenpaares nur das Zeichen wechselt. Näheres hierüber, sowie über die hierbei angewendete „Doppelschaltung" an der citirten Stelle.

100 **Die elektromotorische Kraft.** Durch die im vorigen Paragraphen angeführten Versuche betrachten wir es für erwiesen, dass bei der Berührung heterogener Metalle unter den gegebenen Umständen zwischen den Metallen eine Potentialdifferenz auftritt, welche sich trotz der leitenden Verbindung derselben constant erhält*). Der Satz, dass an allen Punkten eines Leiters oder Systems von Leitern gleicher Temperatur im Falle des elektrischen Gleichgewichts das Potential die gleiche Höhe haben müsse, erleidet also eine Ausnahme für den Fall, dass die berührenden Leiter nicht gleichartig sind. Es muss eine Ursache, d. h. eine Kraft, vorhanden sein, welche ein gewisses Quantum positiver Elektricität von dem einen Metall über die Berührungsstelle nach dem anderen treibt und fortdauernd daselbst auf dem höheren Potentialniveau erhält. Diese Kraft nennt man die elektromotorische Kraft.

Da es sehr wichtig ist, die Wirksamkeit dieser Kraft richtig aufzufassen, so wollen wir auch hier durch Heranziehung einer hydrodynamischen Analogie das Verständniss zu fördern versuchen.

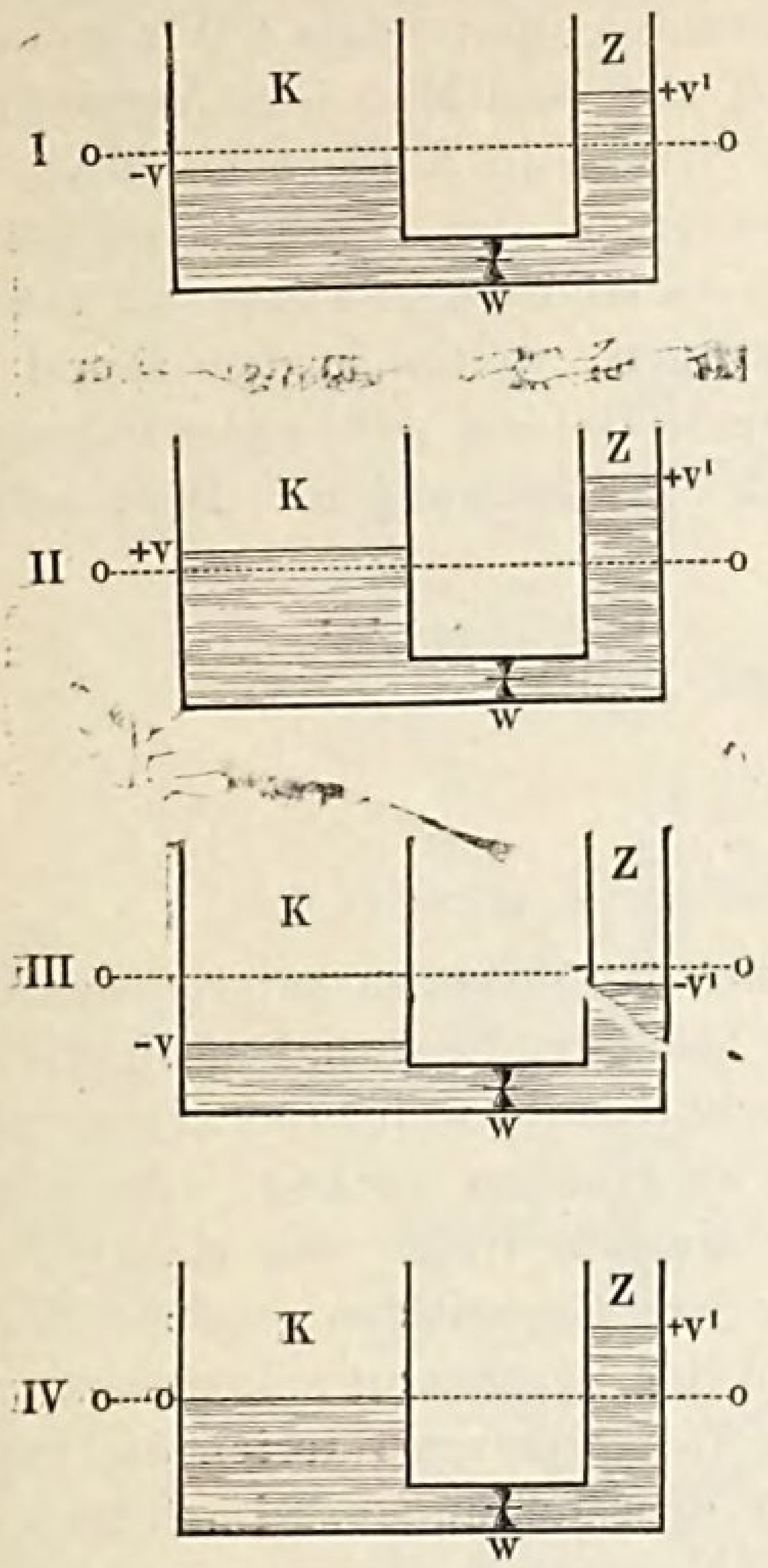
Zwei Gefässe mit senkrechten Wänden werden durch einen horizontalen Canal mit einander in Communication gesetzt (Fig. 278) und Wasser eingegossen, welches sich beiderseits in gleiche Niveauhöhe stellt. Diese Niveauhöhe längs der gestrichelten Linie *oo'* werde mit Null bezeichnet und zum Ausgang einer Höhenscala genommen.

Nun denken wir uns eine Kraft angebracht, welche in dem Verbindungscanal in der Weise wirksam ist, dass sie fortwährend Wasser

*) Wir schreiben absichtlich „bei der Berührung" und nicht „durch die Berührung" und behalten die Erörterung über die Quelle der Contactelektricität auf eine spätere Stelle vor.

von der einen nach der anderen Seite treibt. Wir könnten uns z. B. vorstellen, dass, wie Fig. 278 I andeutet, in den Canal eine Welle mit einem Schraubenrade, ähnlich einer Schiffsschraube, eingesetzt sei, welche mit einer gewissen Kraft in Rotation versetzt werde. Sofort sinkt das Niveau in K und steigt in Z, bis endlich der hydrostatische Gegendruck so gross geworden ist, dass er der treibenden Kraft des Rades das Gleichgewicht hält. Die dem Gleichgewichte entsprechende Niveaudifferenz wird lediglich von der Grösse der das Wasser bewegenden Kraft, nicht aber von den Capacitäten (Querschnitten) der Gefässe abhängen können. Wohl aber muss die Menge des übergeführten Wassers von diesen Capacitäten abhängen. Sind diese Capacitäten einander gleich, so muss das Wasser auf der einen Seite ebenso viel sinken, als es auf der anderen Seite steigt. Die an der Scala abgelesenen Wasserhöhen sind daher entgegengesetzt gleich gross, z. B. $-v$ und $+v$. Sind aber die Capacitäten ungleich, z. B. c und c', so werden die Aenderungen der Wasserhöhen beiderseits ebenfalls ungleich, nämlich v und v' werden, wobei, da die einerseits weggeführte Wassermenge gleich der andererseits zugeführten ist,

Fig. 278.



$$-cv = c'v' \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

sein muss. Die Constanz der Niveaudifferenz wird ausgedrückt durch die Gleichung:

$$v' - v = k = constans \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Was würde nun geschehen, wenn wir die Gefässe von Anfang an oder nach Eintritt des neuen Gleichgewichts mit mehr Wasser anfüllen würden? Auf die Grösse der Niveaudifferenz würde dies offenbar keinen Einfluss haben können, wohl aber auf die absoluten Höhen, welche beiderseits um einen gleichen Betrag wachsen würden. Es können dann die Höhen beiderseits positiv werden (Fig. 278 II). Ebenso würde, wie in Fig. 282 III angedeutet, eine Entnahme von Wasser vor oder nach Action des Schraubenrades die Höhendifferenz nicht ändern,

aber bewirken können, dass beiderseits negative Wasserstände sich einstellen.

Was würde ferner geschehen, wenn man vor oder nach der Action das eine Gefäss mit einem solchen von unendlich grosser Capacität, in welchem das Niveau = Null ist, in Communication setzte? Wir könnten uns vorstellen, dass man das Gefäss K mit dem Meere in Verbindung setzte. Offenbar würde sich dann das Niveau in K nicht merklich ändern, die Niveauänderung in Z würde gleich der constanten Niveaudifferenz sein, Fig. 282 IV. Diese Niveauänderung würde in diesem Falle also das Doppelte von jener betragen, welche in dem zuerst besprochenen Falle eintrat, wo zwei isolirte Gefässe gleicher Capacität angewendet wurden. Das ergeben auch die Gleichungen. Denn setzen wir in 1) $c = \infty$, so erhalten wir

$$v = -\frac{c' v'}{\infty} = \text{Null}$$

$$v' = k + v = k,$$

setzen wir dagegen $c = c'$, dann wird $v' = -v = {}^1/_2\,k$.

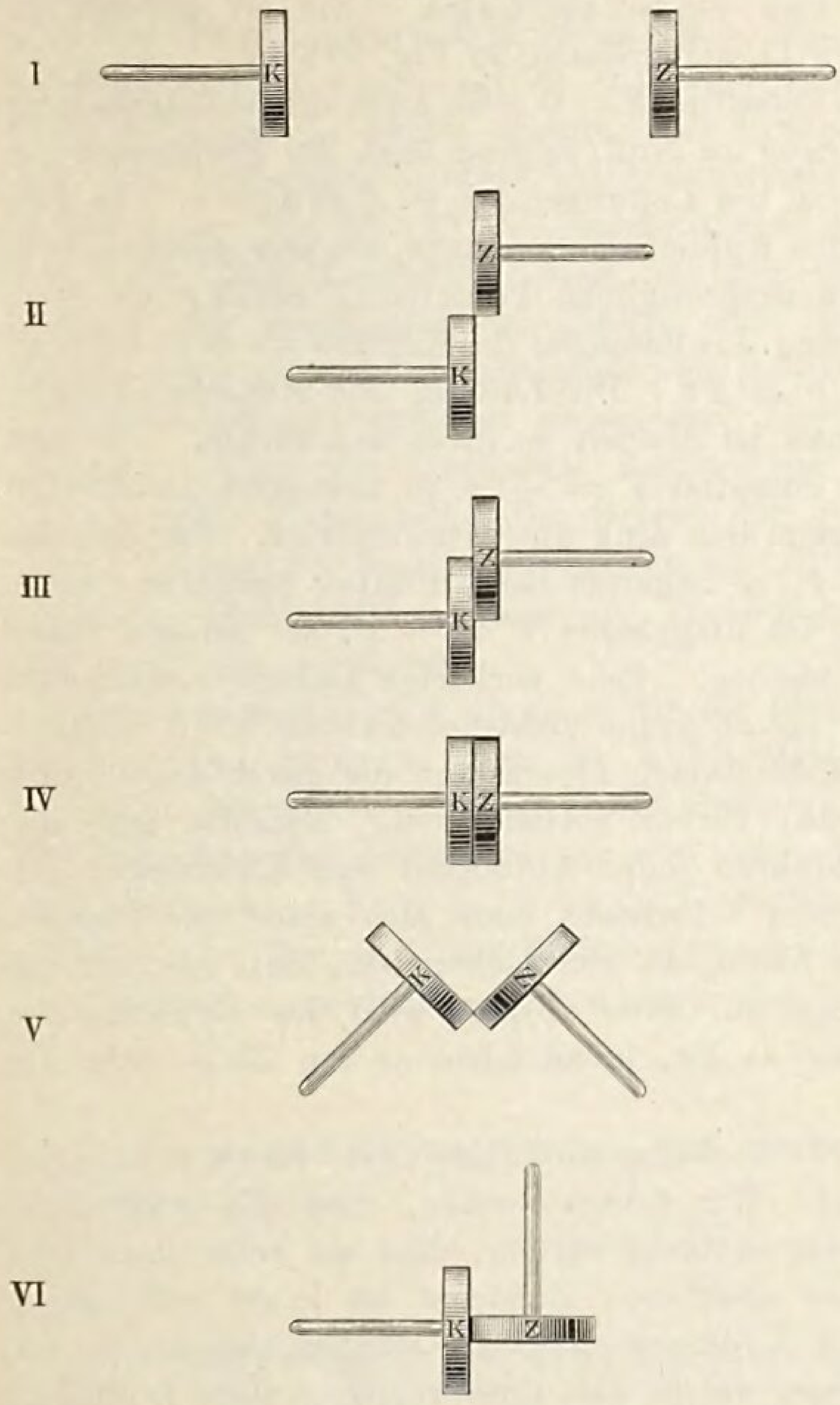
Nun fassen wir wiederum unsere sich berührenden heterogenen Metalle ins Auge. An Stelle der das Wasser hebenden Kraft haben wir die die Elektricität hebende, die elektromotorische Kraft, welche eine constante Potentialdifferenz hervorzubringen und zu erhalten vermag. An Stelle der Querschnitte oder Capacitäten der Gefässe treten die elektrischen Capacitäten der Metallstücke und zwar jene Capacitäten, welche ihnen nach Grösse, Gestalt und Lage während der Berührung zukommen. An Stelle der abgeführten und zugeführten Wassermengen treten die negativen und positiven Elektricitätsmengen oder Ladungen. Im folgenden Paragraphen wollen wir zeigen, welche Folgerungen sich aus dieser Analogie ergeben und wie sich dieselben durch die Erfahrung bestätigen.

101 **Potentiale und Ladungen bei der Berührung und nach der Trennung heterogener Leiter von gleicher Capacität.** Die Bedingung gleicher Capacität zweier sich berührender Leiter können wir sicher und einfach nur dadurch herstellen, dass wir beiden Leitern nicht bloss gleiche Grösse und gleiche Gestalt geben, sondern sie auch in gleicher gegenseitiger Lage zur Berührung bringen. Wählen wir als Beispiel zwei cylindrische Platten aus Kupfer und Zink, welche wir an isolirenden Griffen handhaben können, Fig. 279 I, so würden zum Beispiel die in Fig. 279 II bis V dargestellten Lagen dieser Bedingung entsprechen, während dies bei der Lage nach Fig. 279 VI nicht der Fall wäre.

Wir wollen nun annehmen, dass die beiden Platten vor ihrer Berührung gleiche Ladungen E und ein gleiches Potential V besitzen. Sowie wir sie zur Berührung bringen, wirkt die elektromotorische Kraft,

wodurch ein Quantum (positiver) Elektricität e vom Kupfer auf das Zink hinübergetrieben wird und dadurch die Ladungen auf $E - e$ und $E + e$, die Potentiale auf $V - v$ und $V + v$ gebracht werden, so dass zwischen beiden Platten eine Potentialdifferenz $= 2v$ entsteht. Da wir unter Capacität eines Leiters das Verhältniss der zugeführten Electricitätsmenge zur dadurch bewirkten Potentialänderung verstehen, so sind die Capacitäten der Kupfer- und der Zinkplatte während der Berührung gegeben durch $\frac{e}{v}$ und $\frac{-e}{-v}$, also beide $= \frac{e}{v}$, während sie vor der Annäherung $= \frac{E}{V}$ waren. Es ist nun leicht einzusehen, dass die Capacität $\frac{e}{v}$ grösser sein müsse als $\frac{E}{V}$ und dass sie um so grösser ausfallen müsse, je mehr sich die Platten der in Fig. 279 IV dargestellten Lage eines Condensators nähern. Denn je mehr die gegenseitige Influenz gefördert wird, desto mehr wird das höhere Potential der Zinkplatte durch die Nähe der auf niedrigerem Potential befindlichen Kupferplatte herabgesetzt, während umgekehrt das niedrige Potential der letzteren gesteigert wird. Da aber die hierdurch bewirkte Verminderung der Potentialdifferenz sofort durch die elektromotorische Kraft wiederum ausgeglichen werden muss, indem sie weitere Mengen von (positiver) Elektricität vom Kupfer aufs Zink treibt, so folgt, dass die Menge dieser Elektricität, also die Grösse e, um so mehr wachsen müsse, je mehr sich die Plattenlage der in Fig. 279 IV nähert. Die Capacität, deren Werth $= \frac{e}{v}$, muss daher ebenfalls wachsen, da der

Fig. 279.



Zähler wächst, während der Nenner constant bleibt. Daraus folgt denn auch, dass die Capacität im getrennten Zustande am kleinsten ist.

Die Ladungen, ursprünglich einander gleich, nämlich $= E$, werden während der Berührung $E - e$ und $E + e$. Ihre Differenz $2e$ ist daher keinesfalls in allen Fällen dieselbe, sondern hängt von der Capacität der Platten während der Berührung ab, sie wechselt daher auch von Lage zu Lage. Sie ist grösser in Fig. 279 III als in Fig. 279 II, am grössten in Fig. 279 IV.

Ist das ursprüngliche Potential $V = 0$, also auch die Anfangsladung der Platten vor der Berührung = Null, so sind nach der Berührung die Potentiale $= - v$ und $+ v$, die Ladungen $= - e$ und $+ e$. In diesem Falle ist also dann das Kupfer ebenso stark negativ geladen, wie das Zink positiv. Ist das ursprüngliche Potential V zufällig $= + v$, so ist während der Berührung das Potential des Kupfers $= + v - v = 0$, das des Zinks $= + v + v = 2v$. Die Ladung des Kupfers ist dann ebenfalls $= 0$, die des Zinks ist doppelt so gross wie vorhin. Ist umgekehrt das ursprüngliche Potential $V = - v$, so bekommt das Kupfer die doppelte Ladung, während das Zink unelektrisch wird. Ist das ursprüngliche Potential $V > v$, so behalten beide Platten positives Potential und positive Ladung; ist umgekehrt $V < - v$, so müssen beide Platten negativ elektrisch bleiben. Eine vorherige Ladung breitet sich eben auf den Platten aus, als ob keine elektromotorische Kraft vorhanden wäre und es addiren sich einfach algebraisch die durch diese Kraft erzeugten Ladungen zu den vorher vorhandenen. Dasselbe gilt von nachher stattfindenden Zufuhren (oder Abfuhren) von Elektricität auf die sich berührenden Platten. Entzieht man also einer der Platten, während die andere isolirt bleibt, so viel Elektricität, dass sie auf das Potential Null kommt (leitet zur Erde ab), so wird das Potential der anderen Platte $+ 2v$ oder $- 2v$, je nachdem es die Zink- oder die Kupferplatte ist.

Wie steht es nun mit Ladung und Potential nach erfolgter Trennung der Platten? Wir setzen voraus, dass die getrennten Platten so weit von einander entfernt werden, dass sie keine merkliche Influenz mehr auf einander ausüben. Zunächst ist leicht einzusehen, dass die Platten diejenigen Ladungen behalten werden, welche sie im Moment der Trennung hatten, welche also ihrer relativen Lage in diesem Moment entsprechen. Hebt man also z. B. die Platten in paralleler Lage senkrecht von einander ab, so haben sie nachher dieselben Ladungen wie in Fig. 279 IV während der Berührung. Schiebt man dagegen die Platten parallel über einander und trennt sie in der Lage Fig. 279 II, so haben sie nachher die dieser Lage entsprechenden, viel kleineren Ladungen. Oeffnet man endlich die Platten wie ein Buch und trennt sie in der Lage Fig. 279 V, so haben sie nachher wieder andere Ladungen, welche an Grösse zwischen die beiden vorigen Fälle sich einreihen werden.

Die Ladungen nach der Trennung sind also von der Art der Trennung abhängig, aber immer ebenso gross, wie sie im letzten Moment der Berührung waren.

Ganz anders verhält es sich mit den Potentialhöhen auf den getrennten Platten. Da nämlich durch die Trennung der Platten die Capacität derselben geändert und auf jenen kleineren Werth zurückgeführt wird, welchen sie vor der Berührung hatten, so muss jedenfalls eine Vergrösserung der Potentialwerthe eintreten, also auch eine Vergrösserung der Potentialdifferenz, welche um so ergiebiger ausfallen wird, je mehr früher durch die Lage im letzten Moment der Berührung die Capacität erhöht war. Die Vergrösserung der Potentialdifferenz wird daher bei Trennung aus der Lage Fig. 279 IV viel beträchtlicher sein, als bei jener aus den Lagen Fig. 279 II oder V. Man hat dies früher so dargestellt, dass während der Berührung der Platten ein Theil der entgegengesetzten Elektricitäten gegenseitig gebunden und an der Berührungsfläche beiderseits angehäuft sei, während ein anderer Theil sich frei auf den Platten ausbreite. Nach der Trennung werden die gesammten Elektricitätsmengen jeder Platte frei. Die Grösse der gebundenen Mengen hänge von der Grösse der Berührungsflächen ab. Mithin muss auch die Menge der freien Elektricitäten nach der Trennung von der Grösse der Berührungsflächen abhängen.

Für den normalen Fall, dass wir die Platten zuerst in der Lage IV zur Berührung bringen, dann die Kupferplatte ableitend berühren und hierauf die Platten in paralleler Lage trennen, können wir die Ladungen und Potentiale der Zinkplatte vor und nach der Trennung auf folgende Weise berechnen: Nach §. 75 ist die Capacität eines kreisförmigen Condensators vom Radius r, dem Plattenabstand d und verschwindend kleinen Plattendicken angenähert gegeben durch den Ausdruck

$$C = \frac{r^2}{4\,d}.$$

Die Capacität der getrennten, von allen Leitern weit abstehenden Platte ist genähert:

$$C' = \frac{2\,r}{\pi}.$$

Der Quotient $\frac{C}{C'} = \frac{\pi\,r}{8\,d}$ giebt demnach die Verstärkungszahl. Für die Zinkplatte haben wir vor der Trennung die Capacität $= \frac{r^2}{4\,d}$, das Potential $= 2\,v$, daher die Ladung $= \frac{r^2\,v}{2\,d}$; nach der Trennung die Capacität $= \frac{2\,r}{\pi}$, die Ladung $= \frac{r^2\,v}{2\,d}$, daher das Potential $= \frac{\pi\,r\,v}{4\,d}$. Nach der Theorie wäre also das Potential nach der Trennung direct proportional dem Radius der Platten. Grössere Platten müssten also auch grössere Potentiale ergeben. In der Praxis stellt sich die Sache deshalb etwas

anders heraus, weil, da die Platten nie absolut eben, sondern immer etwas gekrümmt sind, mit der Vergrösserung des Radius r auch der Plattenabstand d zunimmt. Nehmen wir an, was der Wirklichkeit nahe kommen dürfte, dass grössere Plattenpaare eine geometrisch ähnliche Form haben, so wächst d im nämlichen Verhältniss wie r und dann ergiebt sich, dass die grösseren Platten nach der Trennung kein grösseres Potential zeigen als kleinere Platten.

Eine andere Frage ist jedoch die, ob zum Nachweis der Contactwirkung mittelst eines Elektroskops ein grösseres Plattenpaar einen Vorzug vor einem kleineren besitzt oder nicht. Die Antwort hierauf hängt davon ab, ob man das Elektroskop durch eine einmalige Berührung der Platten und Uebertragung ihrer Elektricität an das erstere laden will, oder durch beliebig vielfache Wiederholung des Verfahrens. Im ersten Falle bietet das grössere Plattenpaar einen Vortheil, im zweiten Falle nur insofern, als die Anzahl der nöthigen Wiederholungen zur Erreichung desselben Effectes desto kleiner wird, je grösser die Platten sind. Es ist dies leicht zu erklären. Hätte das Elektroskop eine verschwindend kleine Capacität gegenüber jener der Platten, so würde es bei der Uebertragung stets dasselbe Potential annehmen wie die übertragende Platte*). Es würde dann keinen Unterschied machen, ob die Platten grösser oder kleiner sind. Da aber jedes Elektroskop eine mehr oder minder beträchtliche Capacität besitzt und die Ladung der übertragenden Platte sich im Verhältniss der Capacitäten zwischen Platte und Elektroskop vertheilt, so muss natürlich bei dieser Uebertragung das Potential um so mehr sinken, je kleiner die Capacität der Zinkplatte im Verhältniss zu jener des Elektroskops ist. Grössere Platten werden also das Elektroskop bei einmaliger Uebertragung jedenfalls stärker laden. Bei Wiederholung der Ladung muss das Potential des Elektroskops so lange steigen, bis es jenes der abgehobenen Platte erreicht hat. Nach der Theorie ganz ebener Platten ist dieses Potential dem Plattenradius proportional; die grösseren Platten werden also auch stärker laden. In der Praxis dürfte aus den oben abgeleiteten Gründen die bis zur Grenze wiederholte Ladung durch grössere Platten kaum grössere Wirkung ergeben als kleinere Platten.

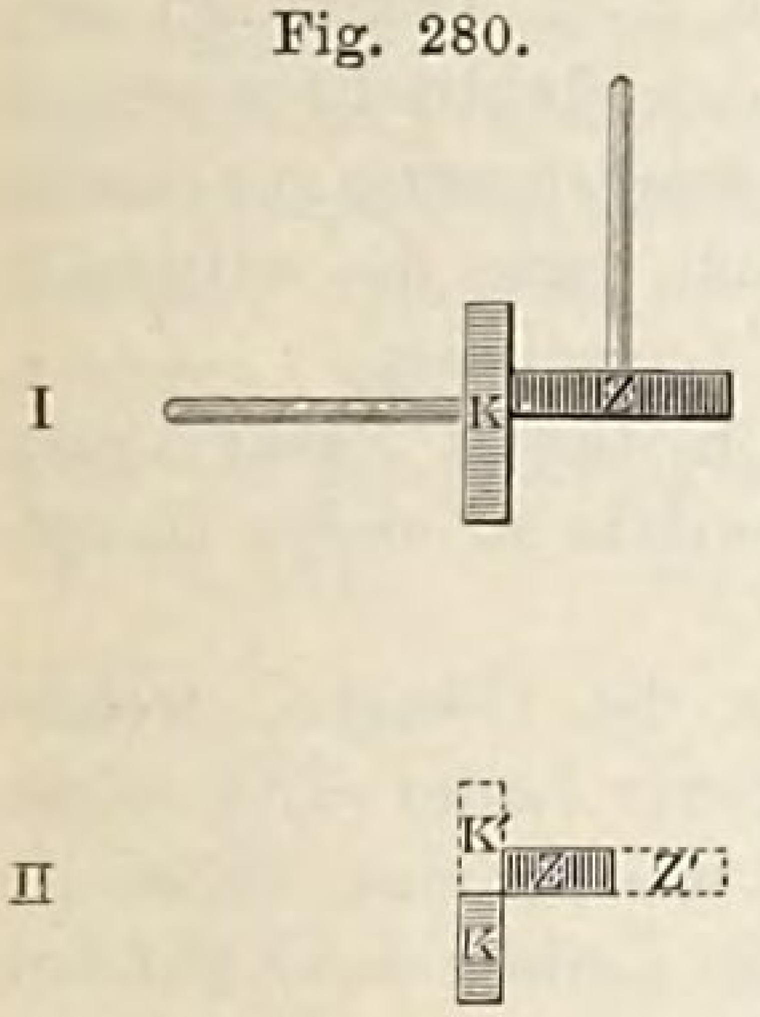
102 **Potentiale und Ladungen bei der Berührung und nach der Trennung heterogener Leiter von ungleicher Capacität; Uebersicht der Resultate.** Die im vorigen Paragraphen abgeleiteten Resultate haben nicht mehr volle Gültigkeit, wenn die zur Berührung gebrachten Leiter ungleiche Capacität besitzen. Dabei sind aber die beiden Fälle zu unterscheiden: der erste, bei welchem diese Ungleichheit nur auf der ungleichen gegenseitigen Lage bei der Berüh-

*) Vorausgesetzt, dass die Platte und das Elektroskop aus demselben Metalle sind, oder doch deren Potentialdifferenz verschwindend klein ist gegenüber der Potentialdifferenz des getrennten Plattenpaares.

rung beruht, also nach der Trennung nicht mehr fortbesteht; der zweite, bei welchem die Ungleichheit der Capacitäten auf der verschiedenen Grösse oder Gestalt der Platten beruht, also auch nach der Trennung fortbesteht.

Um den ersten Fall darzulegen, beachten wir das in Fig. 280 I dargestellte Beispiel. Zwei Platten aus Kupfer und Zink, die wir uns diesmal mit quadratischer Basis denken wollen, seien so zur Berührung gebracht, wie dies die Figur im Profile zeigt. Um einzusehen, dass die beiden Platten in dieser Lage nicht eine gleich grosse Capacität haben können, denken wir uns dieselben so entstanden, dass (Fig. 280 II) erst die Hälften k und z vorhanden waren und dann noch die anderen Hälften k' und z' daran gesetzt wurden. Die beiden halben Platten k und z haben vollkommen gleiche gegenseitige Lagen. Auf ihnen würde sich also auch die Influenz ganz symmetrisch gestalten und sie würden daher auch gleiche Capacität haben müssen. Legen wir nun aber die fehlenden Hälften dazu, so sehen wir ein, dass die Influenz von z und z' auf k' stärker sein muss als auf k; dagegen, dass die Influenz von k und k' auf z' geringer sein müsse als auf z. Die Erhöhung des Potentials auf dem Kupfer durch den Einfluss des höheren Potentials des Zinks ist also jedenfalls bedeutender, als die Verminderung des Potentials des Zinks durch das niedrigere Potential des benachbarten Kupfers. Da aber die vom Kupfer abgeflossene Elektricitätsmenge gleich sein muss der dem Zink zugeflossenen, so muss das Verhältniss zwischen der Aenderung der Elektricitätsmenge und der Potentialänderung auf dem Kupfer kleiner sein als auf dem Zink, d. h. die Capacität der Kupferplatte ist bei dieser Lage kleiner als die der Zinkplatte.

Fig. 280.



Während also die Platten im vorigen Paragraphen durch die Berührung Potentialwerthe annahmen, deren Mittelwerth gleich ihrem Potential vor der Berührung war, ist dieses hier nicht mehr der Fall. Ist das Potential vor der Berührung auf beiden Platten gleich Null, so besitzt es während der Berührung ungleiche entgegengesetzte Werthe. Nur die Ladungen sind dann entgegengesetzt gleich.

Mit der Trennung und Entfernung der Platten verschwindet jedoch diese Verschiedenheit. Dieselben nehmen gleiche Capacitäten und damit solche Potentialwerthe an, welche sich vom ursprünglichen Werthe vor der Berührung gleich weit nach auf- und abwärts entfernen.

Im zweiten Falle, wo die Ungleichheit der Capacitäten durch ungleiche Grösse oder ungleiche Gestalt der Leiter oder beide Umstände zusammen hervorgebracht ist, könnte es vorkommen, dass diese Ungleichheit durch die gegenseitige Lage der berührenden Leiter ausgeglichen wird. So müsste es z. B. möglich sein, durch Verkürzung der Zinkplatte in Fig. 280 I diesen Specialfall herzustellen. Im Allgemeinen

wird aber das eintreten, was wir durch die Analogie mit den Wassergefässen in §. 100 abgeleitet haben; die Aenderungen des Potentials der Leiter werden in umgekehrtem Verhältnisse zu ihren Capacitäten stattfinden. Waren also die Platten vorher unelektrisch, so haben sie während der Berührung ungleich grosse entgegengesetzte Potentiale; nur die Ladungen sind entgegengesetzt gleich gross.

Nach der Trennung und Entfernung der Platten werden die Potentiale noch weiter aus einander weichen; da aber in diesem Falle das Verhältniss der Capacitäten der beiden Leiter im Allgemeinen nicht dasselbe bleiben wird, welches während der Berührung galt, so lässt sich über die Potentialwerthe der getrennten Leiter in diesem Falle keine allgemeine Regel aussprechen. Es bleibt dann nur mehr das Eine sicher, dass die Aenderungen der Ladungen (vor Berührung und nach Trennung) entgegengesetzt gleich gross sind. Waren keine fremden Elektricitätsmengen im Spiele, so müssen nach der Trennung die Ladungen entgegengesetzt gleich gross sein. In diesem Falle verhalten sich dann die entgegengesetzten Werthe der Potentiale verkehrt wie die Capacitäten.

Wir wollen nun noch die im vorigen und in diesem Paragraphen abgeleiteten, etwas verwickelt erscheinenden Resultate in einige Hauptsätze zusammenfassen:

1. Elektromotorische Kraft nennen wir die Ursache, welche bewirkt, dass bei der Berührung heterogener Leiter eine solche Vertheilung der Elektricität stattfindet, welche eine constante Potentialdifferenz auf den sich berührenden Leitern hervorbringt und unterhält.
2. Die Grösse dieser Potentialdifferenz während der Berührung ist unabhängig von der Capacität, also von der Grösse, Gestalt und gegenseitigen Lage der sich berührenden Leiter, sowie von der Grösse der sich berührenden Flächen, ferner unabhängig von den absoluten Werthen des Potentials, also auch von den etwa zugeführten oder abgeführten Elektricitätsmengen. Sie hängt allein ab von der materiellen Beschaffenheit (und der Temperatur) der Leiter.
3. Die (absoluten) Werthe des Potentials auf den sich berührenden Leitern sind ausser von deren materieller Beschaffenheit (und Temperatur) noch abhängig von den Capacitäten der Leiter und von den vor der Berührung vorhandenen oder nachher zugeführten oder abgeführten Elektricitätsmengen. Sind diese gleich Null, so haben die Potentiale dem Zeichen nach entgegengesetzte, den Capacitäten der Leiter verkehrt proportionale Werthe. Bei gleichen Capacitäten sind die Potentiale entgegengesetzt gleich gross. Bei unendlich grosser Capacität des einen Leiters (Ableitung desselben) wird sein Potential = Null, das des anderen verdoppelt.
4. Die Potentialwerthe nach Trennung und Entfernung der Leiter hängen ausser von der materiellen Beschaffenheit

(und Temperatur) derselben auch ab von deren Capacitäten im Momente der Trennung und den Capacitäten nach der Entfernung, also von ihrer Grösse und Gestalt, sowie von ihrer Lage im Momente der Trennung; endlich noch von etwa vorher oder nachher zu- oder abgeführten fremden Elektricitätsmengen. Sind letztere = Null, so sind die Potentiale entgegengesetzten Zeichens und verkehrt proportional den schliesslichen Capacitäten. Ihre absoluten Werthe sind um so höher, je kleiner die schliesslichen Capacitäten im Verhältniss zu jenen im Momente der Trennung sind.

Die Spannungsreihe, Gesetz von Volta. Nach Satz 2 am Schlusse des vorigen Paragraphen ist die Potentialdifferenz, also auch die elektromotorische Kraft von der Natur der sich berührenden Körper abhängig. Wenn man daher den Volta'schen Fundamentalversuch mit verschiedenen Metallpaaren anstellt, so erhält man am Elektrometer unter sonst gleichen Umständen verschieden grosse Ausschläge. Die folgenden Tabellen enthalten nach verschiedenen Autoren aufgestellte Reihen von Körpern, welche so geordnet sind, dass immer jeder vorausgehende das höhere, jeder nachfolgende das niedrigere Potential annimmt. 103

Volta	Seebeck	Pfaff	Peclet
+	+	+	+
Zink	Zink	Zink	Zink
Blei	Blei (polirt)	Cadmium	Blei
Zinn	Zinn	Zinn	Zinn
Eisen	Blei (rauh)	Blei	Wismuth
Kupfer	Antimon	Wolfram	Antimon
Silber	Wismuth	Eisen	Eisen
Gold	Eisen	Wismuth	Kupfer
Kohle	Kupfer	Antimon	Gold
Graphit	Platin	Kupfer	—
Braunstein	Silber	Silber	—
—	—	Gold	—
—	—	Tellur	—
—	—	Platin	—
—	—	Palladium	—

Wie man sieht, stimmen diese Reihen nicht immer ganz überein, was durch Beobachtungsfehler oder auch durch Unreinheit der Metalle oder deren Oberfläche (Oxydation derselben) verursacht sein mag. Legen wir Volta's Reihe zu Grunde, so folgt aus derselben beispielsweise, dass Zink mit allen übrigen aufgeführten Körpern positiv, Braunstein mit allen übrigen negativ elektrisch wird, dass Kupfer mit Zink bis Eisen negativ, mit Silber bis Braunstein dagegen positiv elektrisch wird.

Volta begnügte sich nicht damit, die untersuchten Körper in eine Spannungsreihe zu ordnen, er versuchte auch aus den Ausschlägen des

Strohhalmelektrometers relative Werthe für die elektromotorischen Kräfte abzuleiten. Er fand auf diese Weise die elektromotorischen Kräfte von:

Zink \| Blei	= 5,	Kupfer \| Silber	= 1,
Blei \| Zinn	= 1,	Zink \| Silber	= 12,
Zinn \| Eisen	= 3,	Zinn \| Kupfer	= 5,
Eisen \| Kupfer	= 2,	Zink \| Eisen	= 9.

Addirt man nun die elektromotorischen Kräfte der ersten fünf Combinationen, so erhält man als Summe 12. Diese Zahl ist gleich gross, wie die elektromotorische Kraft der Combination Zink | Silber, welche aus dem ersten und letzten Körper der ersten fünf Combinationen gebildet ist. Ebenso verhält es sich mit der Combination Zinn | Kupfer; denn man hat

$$\underbrace{\text{Zinn} \mid \text{Eisen}}_{3} + \underbrace{\text{Eisen} \mid \text{Kupfer}}_{2} = \underbrace{\text{Zinn} \mid \text{Kupfer}}_{5}$$

Ebenso mit der Combination Zink | Eisen; denn es ist

$$\underbrace{\text{Zink} \mid \text{Blei}}_{5} + \underbrace{\text{Blei} \mid \text{Zinn}}_{1} + \underbrace{\text{Zinn} \mid \text{Eisen}}_{3} = \underbrace{\text{Zink} \mid \text{Eisen}}_{9}$$

Volta entdeckte damit ein Gesetz, welches für alle Körper gilt, welche die Elektricität leiten, ohne dabei zersetzt zu werden. Solche Körper nannte er Leiter der ersten Ordnung. Das Gesetz Volta's lautet:

Die elektromotorische Kraft (Potentialdifferenz) zwischen zwei Leitern der ersten Ordnung ist gleich der Summe der elektromotorischen Kräfte (Potentialdifferenzen) aller dazwischen liegenden Combinationen der Spannungsreihe.

Nimmt man demnach aus einer Spannungsreihe drei Glieder heraus, die wir mit m_1, m_2, m_3 bezeichnen wollen, so ist stets

$$m_1 \mid m_2 + m_2 \mid m_2 = m_1 \mid m_3,$$

also auch

$$m_1 \mid m_2 = m_1 \mid m_3 - m_2 \mid m_3.$$

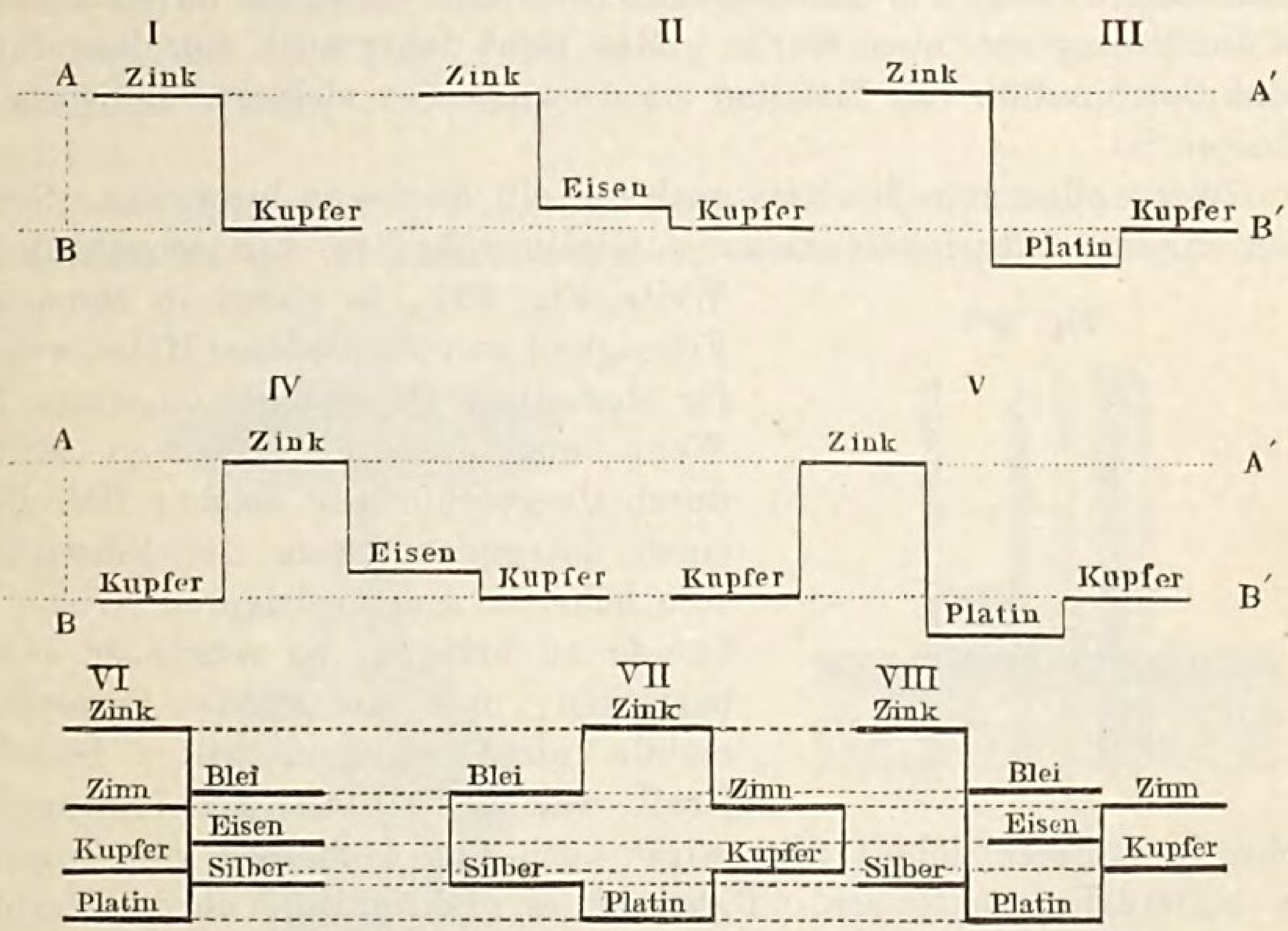
Waren auch Volta's Versuche nicht genau genug, um dieses Gesetz sicher nachzuweisen, so gelang es ihm doch, aus einer Thatsache dasselbe sicher abzuleiten, welche wir oben (§. 102, Versuch 3) mitgetheilt haben. Nimmt man einen Condensator aus zwei gefirnissten Platten verschiedener Metalle und verbindet man die beiden Platten durch ein drittes Metall, oder durch eine Kette irgend welcher Metallstücke, so erhält man nach dem Abheben stets denselben Ausschlag, wie wenn man die Verbindung mit einem jener Metalle hergestellt hätte, aus welchen die Condensatorplatten bestehen.

Um diesen Sachverhalt zu erklären, bedienen wir uns einer neuerdings üblich gewordenen schematischen Darstellungsweise, welche sich der hydrodynamischen Analogie im §. 100 anschliesst. Wir stellen nämlich die Potentialhöhen der sich berührenden Leiter durch die Vertical-

abstände von horizontalen Linienstücken dar, deren jedes einem der Leiter entspricht. Die Potentialdifferenz zwischen zwei beliebigen dieser Leiter ist dann durch die Höhendifferenz der Linienstücke gegeben. Der Ordinatenmaassstab ist dabei ein willkürlich gewählter.

Die Schemata der Fig. 281 sind in dieser Weise gezeichnet. Das Schema I z. B. stellt die Combination Zink-Kupfer vor, die Höhendifferenz AB bedeutet die Potentialdifferenz zwischen diesen beiden Metallen. Schema II zeigt die Combination Zink-Eisen-Kupfer, Schema III die Combination Zink-Platin-Kupfer. So lange dieselben Metalle Zink und Kupfer an den Enden stehen, kann die Potentialdifferenz nie eine andere werden, als der Niveaudifferenz AB entspricht, wenn auch die

Fig. 281.

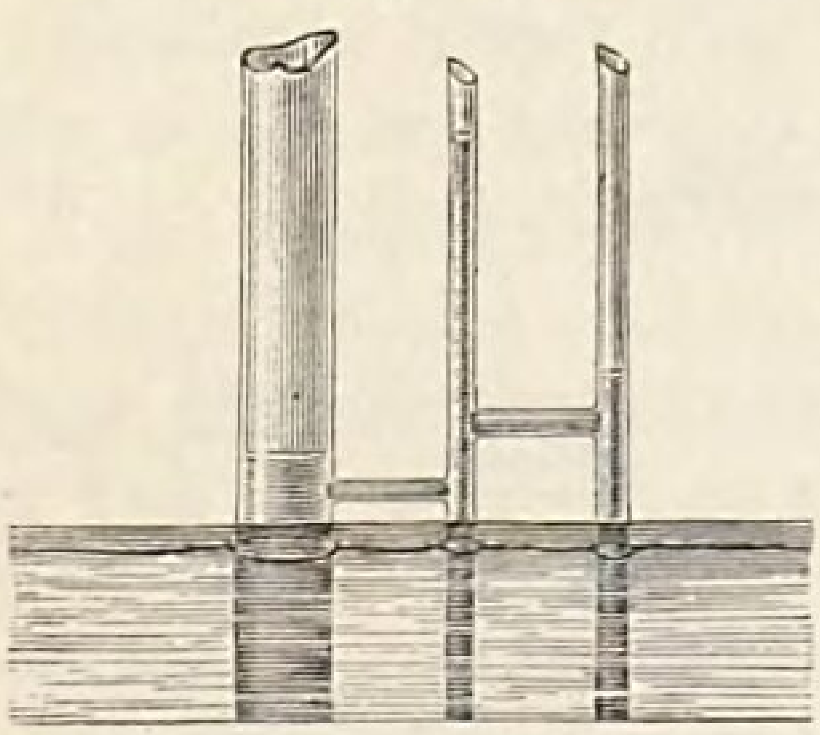


Zwischenglieder beliebig ausgewählt werden. In den Schematen IV und V bildet Kupfer beide Enden; die Potentialdifferenz an denselben kann daher nur = Null, d. h. das Potentialniveau kann nur dasselbe sein. Die absolute Höhe des Potentials hängt davon ab, welchem der Leiter man den Potentialwerth Null giebt. Würde z. B. das Zink auf das Potential Null gebracht, so setzen wir das Niveau $AA' = 0$, die übrigen Metalle erhalten dann sämmtlich negative Potentiale. Wird dagegen das Potential des Kupfers auf Null gebracht, so setzen wir das Niveau $BB' = 0$, dann erhalten Zink und Eisen positives, Platin negatives Potential. Wären die Metalle ganz unelektrisch und isolirt zur Berührung gebracht worden, so ginge (gleiche Capacitäten derselben vorausgesetzt) das Niveau = 0 in mittlerer Höhe zwischen AA' und BB' hindurch. Das Schema VI versinnlicht den Fall, wo sieben Metalle sämmtlich in gegenseitiger Be-

rührung sind, das Schema VII den Fall einer in sich geschlossenen Kette von sechs Metallen, das Schema VIII eine verästelte Anordnung, wobei zwei Gruppen von je drei Metallen zunächst direct unter sich und durch Platin indirect mit einander in Verbindung stehen. Man übersieht sofort, dass, wenn eines der Metalle in allen diesen Fällen auf derselben absoluten Potentialhöhe steht, dann auch jedes andere Metall in jeder Combination auf eine constante Potentialhöhe zu stehen kommt; denn nur unter dieser Bedingung entspricht der Berührung der nämlichen Metallpaare überall die ihnen entsprechende constante Potentialdifferenz. Daraus folgt weiter, dass, wenn man irgendwo zwischen zwei Metallen einer solchen Kette oder Gruppe eine metallische directe oder indirecte Verbindung herstellt, an der Verbindungsstelle schon vor der Berührung dieselbe Potentialdifferenz herrschen muss, die daselbst durch die Berührung entstehen würde. Man sieht daher auch ein, dass durch keine Combination von Metallen ein dauernder elektrischer Strom zu erhalten ist.

Wir wollen zum Schlusse noch auf ein Analogon hinweisen. Senkt man in eine Flüssigkeit mehrere Capillarröhrchen von verschiedener Weite, Fig. 282, so steigt in ihnen die Flüssigkeit zu verschiedener Höhe, welche für denselben Querschnitt constant ist. Wenn nun Jemand versuchen wollte, durch Querverbindung solcher Röhrchen einen dauernden Strom der Flüssigkeit vom höheren zum niedrigeren Niveau zu Stande zu bringen, so würde er sofort bemerken, dass ein solches Perpetuum mobile nicht gelingen will. Dieselbe Kraft, welche die Flüssigkeit im engeren Rohre in grössere Höhe treibt, wirkt auch dem Abfliessen vom engeren ins weitere Rohr entgegen. Dabei ist es gleichgültig, ob das Verbindungsrohr den Querschnitt des engeren oder weiteren Rohres oder irgend einen anderen Querschnitt hat.

Fig. 282.



104 **Verhalten der Leiter zweiter Ordnung.** Schon Volta hat gezeigt, dass die leitenden Flüssigkeiten, wie gewöhnliches Wasser, Salzlösungen, Säuren, sich dem Spannungsgesetze, welches er für die Leiter der ersten Ordnung, zu welchen insbesondere die Metalle gehören, nachgewiesen hatte, nicht fügen. Er nannte sie daher Leiter der zweiten Ordnung. Heute rechnen wir hierzu alle Leiter, welche, indem sie leiten, eine chemische Veränderung erfahren. Es sind auch feste Körper entdeckt worden, welche in diese Ordnung gehören, z. B. Chlorsilber. Volta glaubte, dass bei der Berührung dieser Leiter zweiter Ordnung mit denen der ersten Ordnung keine oder nur unerhebliche Potentialdifferenzen entstehen. Dies ist aber nicht richtig. Um das

Auftreten solcher Potentialdifferenzen, z. B. zwischen Zink und Wasser, experimentell nachzuweisen, sind verschiedene Methoden vorgeschlagen worden, von denen die von **Buff** als die beste erscheint. Auf ein sehr empfindliches Elektroskop, Fig. 283, wird eine Zinkplatte *a* aufgeschraubt, darauf eine möglichst dünne, an der Unterseite und am Rande gefirnisste, gut getrocknete Glasscheibe *b* oder noch besser eine Glimmerplatte von grösserem Durchmesser aufgelegt. Auf der oberen Seite wird sodann mittelst eines Pinsels mit Vermeidung des Randes eine Schicht der Flüssigkeit ausgebreitet oder auch ein mit derselben getränktes Blatt Fliesspapier aufgelegt. Hierauf berührt man mittelst eines isolirten Zinkdrahtes *d* einerseits die Zinkplatte, andererseits die Flüssigkeit. Hebt man dann nach Entfernung des Drahtes die Glasscheibe ab, so divergiren die Goldblättchen mit negativer Elektricität. Das Zink wird also in Berührung mit Wasser, noch mehr mit angesäuertem Wasser oder Salzlösung, negativ, die Flüssigkeit positiv elektrisch.

Dieses Experiment ist ganz einwurfsfrei und streng beweisend. Nicht dasselbe gilt von einem anderen, welches **Becquerel** angegeben

Fig. 283.

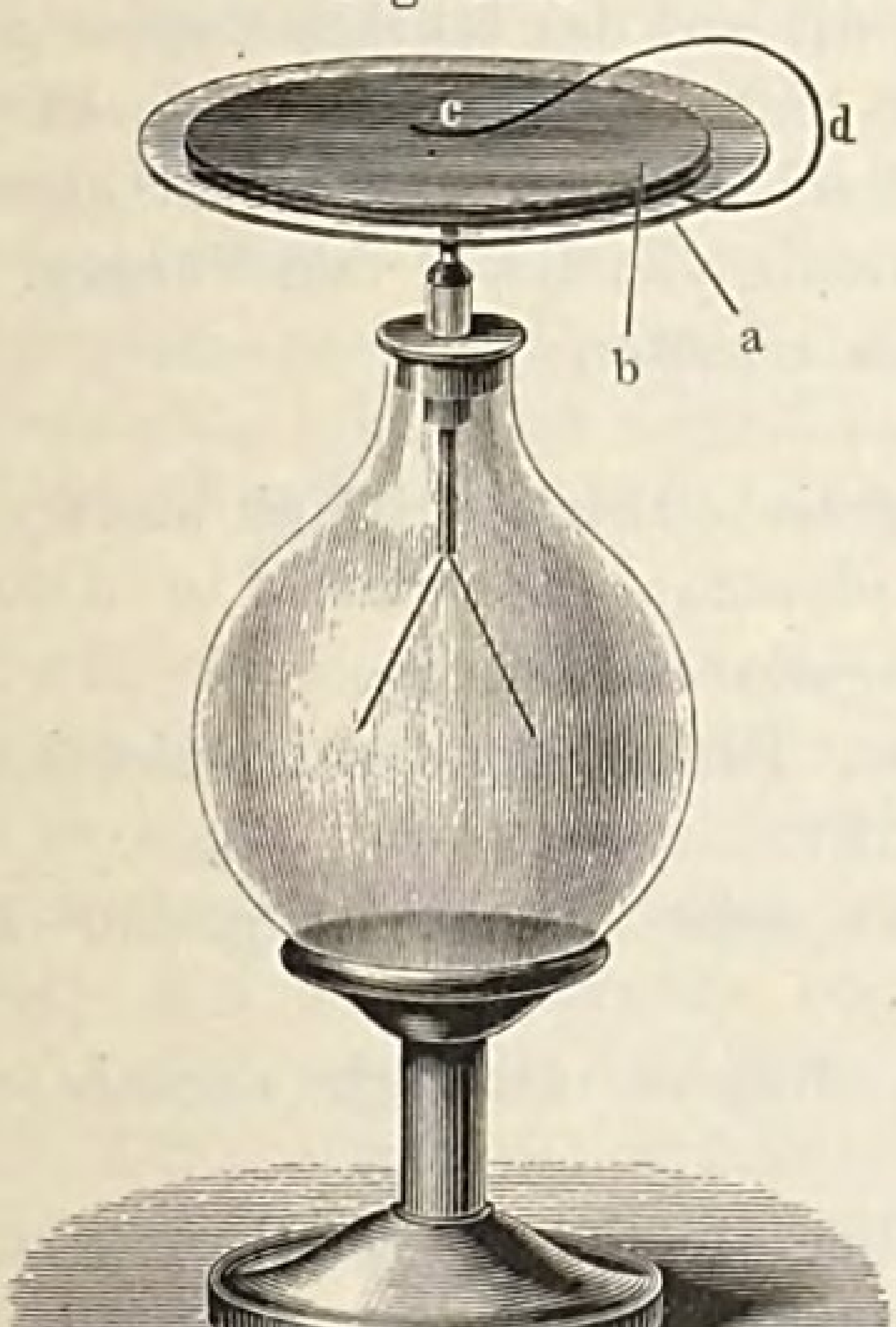
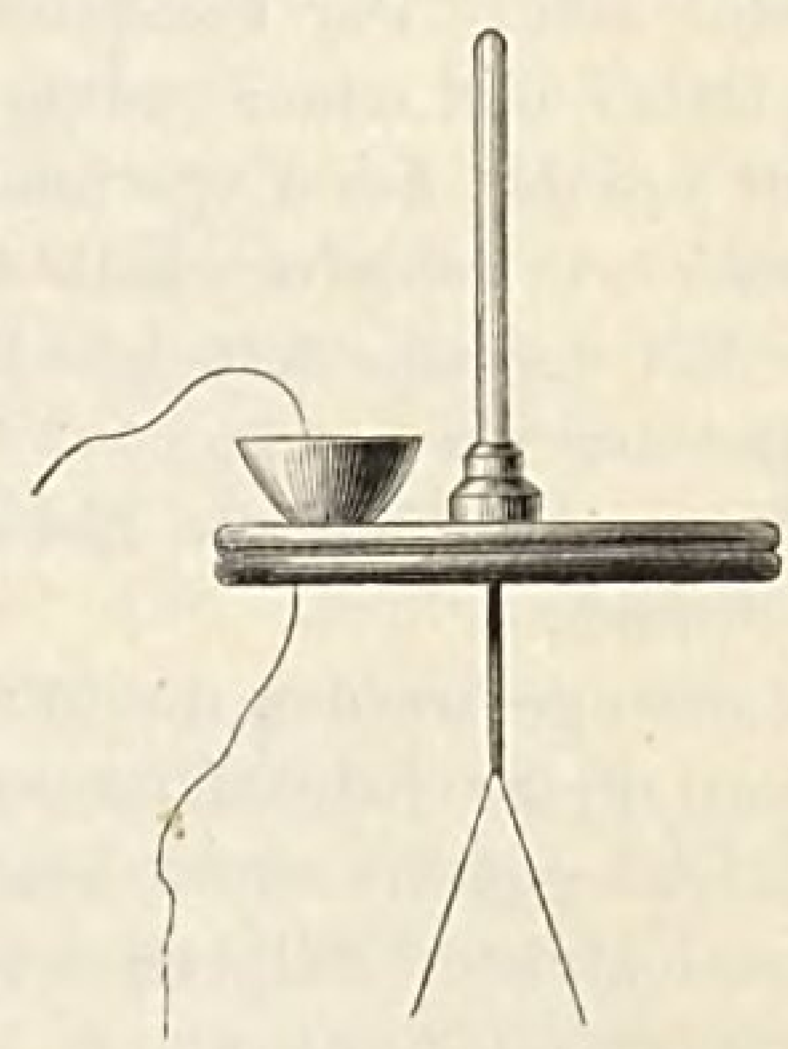


Fig. 284.



hat. Derselbe setzte auf einen Condensator aus zwei gleichen Metallen, z. B. Kupfer, welcher auf dem Elektroskop befestigt war, ein kleines Schälchen (Fig. 284) aus demselben Metalle und füllte dasselbe mit Kalilauge. Hierauf berührte er sowohl die untere Platte als auch die Flüssigkeit ableitend mit dem Finger. Nach dem Abheben divergirten die Goldblättchen mit positiver Elektricität und **Becquerel** schloss daraus, dass das Kupfer in Berührung mit der Kalilauge negativ, die letztere positiv elektrisch werde. Der Versuch wäre aber nur dann beweisend, wenn feststände, dass durch Berührung der Kupferplatte sowohl als der Kali-

lauge mit der feuchten Hand keine oder doch gleich grosse Erregungen entstehen.

Um andere Metalle zu untersuchen, wendete Becquerel ein Schälchen aus denselben an und berührte dann, um die elektromotorische Kraft zwischen dem Metall des Schälchens und der oberen Condensatorplatte zu compensiren, die untere Platte statt direct mit der Hand mittelst eines in der Hand gehaltenen Stabes von gleichem Metalle wie das Schälchen. Der Einwurf gegen die Beweiskraft bleibt natürlich derselbe.

von Beetz hat die folgende Versuchsanordnung angegeben. Die S. 334, Fig. 277, abgebildete Condensatorplatte wird, wie dort beschrieben, auf die trockene Tischplatte gestellt. Daneben wird auf die Tischplatte ein Stück angenässtes Filtrirpapier gelegt und mit einem zweiten grösseren Blatte überdeckt, so dass dasselbe noch feucht wird. Nun wird eine am isolirenden Glasstiele gehaltene Zinkplatte auf das feuchte Papier gedrückt und dann mit dem Kügelchen der Condensatorplatte berührt. Nachdem dieser Vorgang 10- bis 15 mal wiederholt ist, wirkt die abgehobene Condensatorplatte stark abstossend auf die negativ geladene Hollundermarkkugel des Bifilarelektroskops.

Natürlich muss bei diesem Versuche auch die Condensatorplatte von Zink sein. Der Umstand, dass die auf das feuchte Papier gesetzte Zinkplatte mit einer adhärirenden Schicht Wasser bedeckt bleibt, scheint uns für das Experiment und seine Beweiskraft nicht günstig zu sein und wir geben deshalb der Methode von Buff den Vorzug. Nach dieser hat derselbe folgende Resultate erhalten:

Bei der Berührung:

mit Wasser werden die Metalle negativ elektrisch, Zink stark, Platin schwach,
„ Kalilauge werden die Metalle negativ elektrisch,
„ verdünnter Schwefelsäure: Zink, Eisen, Kupfer in abnehmender Stärke negativ, Gold, Platin positiv,
„ concentrirter Salpetersäure: Zink sehr schwach negativ, Kupfer, Eisen, Gold positiv,
„ Zinkvitriollösung: Zink stark, Kupfer schwach negativ, Platin positiv.

Spätere quantitative Versuche über die elektromotorische Kraft zwischen Metallen und Flüssigkeiten sind insbesondere von Peclet, Pfaff, die genauesten von Hankel und Gerland angestellt worden. Ausserdem werden auch zwischen verschiedenen sich berührenden Flüssigkeiten elektromotorische Kräfte erregt. Wir müssen bezüglich dieses Gegenstandes auf die ausführliche Darstellung in G. Wiedemann's Galvanismus verweisen.

105 Die Ableitung zur Erde, Exner's Capacitätsversuch.

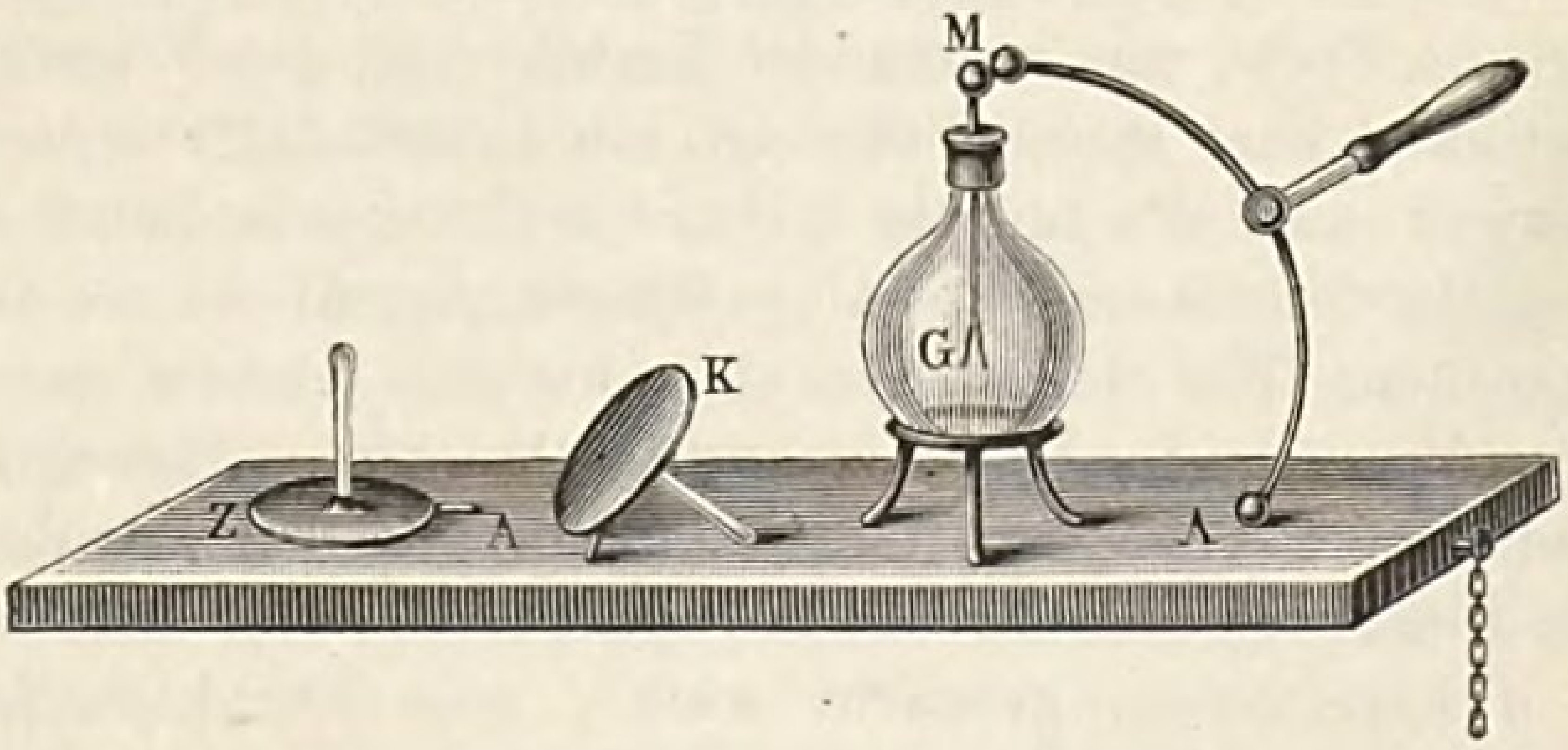
Wir haben bisher das Potential der Erde gleich Null gesetzt und angenommen, dass jeder Leiter, welcher mit der Erde leitend verbunden ist,

ebenfalls das Potential Null besitze. Die Ableitung zur Erde geschieht nun entweder durch Berührung mit dem Finger, der durch die Flüssigkeiten des Körpers mit dem Fussboden und durch die Feuchtigkeit desselben mit den Mauern des Hauses und durch diese in Verbindung mit dem Erdboden steht: oder, da auf diese Weise nicht sicher eine gute Ableitung von geringem Widerstande zu erhalten ist, durch Verbindung des abzuleitenden Körpers mit einem direct zur Erde führenden Metalle, z. B. dem Eisen der Gasleitung, dem Kupfer des Blitzableiters, dem Zinke der Dachrinnen etc.

Nach den Mittheilungen des vorausgegangenen Paragraphen ist nun die Annahme nicht mehr haltbar, dass ein so abgeleiteter Körper das Potential der Erde habe, oder dass alle abgeleiteten Leiter unter sich dasselbe Potential haben. Wäre die Erde ein Leiter der ersten Ordnung, so müsste jeder metallisch abgeleitete Leiter stets ein bestimmtes ihm eigenthümliches Potential haben, und die Differenzen der Potentiale verschiedener so zur Erde abgeleiteter Leiter müssten dieselben sein, wie sie durch gegenseitige Berührung der isolirten Leiter entstehen würden, d. h. sie müssten der Spannungsreihe entsprechen. Ist dagegen die Erde, was wegen der Verbreitung des Wassers und der Bodenfeuchtigkeit eher anzunehmen ist, ein Leiter der zweiten Ordnung, so müssen zwar auch alle mit ihr direct verbundenen Leiter der ersten Ordnung verschiedene Potentiale haben, welche aber nicht der Spannungsreihe entsprechen. Wir wollen nun aber, um dies letztere zu vermeiden, die folgenden Versuche in der Weise angestellt denken, dass wir zunächst den Erdboden mit einer metallenen Ableitung A zur Berührung bringen, welche hierdurch ein- für allemal auf ein constantes Potential, das wir durch a bezeichnen, gebracht wird. Alle abzuleitenden Körper wollen wir mit dieser Metallmasse in Berührung gebracht denken. In diesem Falle entsprechen den verschiedenen Leitern erster Ordnung, welche so abgeleitet sind, wiederum Potentialwerthe, deren Differenzen der Spannungsreihe entsprechen, nur dass die absoluten Werthe der Potentiale um eine Constante von jenem Werthe abweichen, der bei directer Berührung mit der Erde als Leiter erster Ordnung auftreten würde. Die Potentiale, welche die Metalle: Kupfer, Zink, Messing, Gold in Berührung mit der Ableitung A annehmen, wollen wir mit k, z, m, g bezeichnen und die specifischen Potentiale dieser Metalle nennen. In Fig. 285 (a. f. S.) stelle nun A eine mit der Ableitung verbundene metallene Tischfläche vor, z eine flach darauf gesetzte Zinkplatte, k eine schief aufgelegte Kupferplatte; daneben stehe ein Elektroskop, dessen messingener Knopf mittelst des Ausladers ebenfalls mit der Tischplatte A ableitend berührt wird. Es hat dann das Zink das Potential z, das Kupfer das Potential k, der Messingknopf das Potential m, die Goldblättchen endlich haben das Potential g. Jetzt entfernen wir den Auslader und heben die Metallplatten an ihren isolirenden Handgriffen in die Höhe. Sofort haben alle Potentiale ihren Werth geändert, weil die

Capacitäten der Leiter andere geworden sind (§. 102). Die Aenderung ist aber bei allen eine ungleiche, daher der Werth ihres Potentials ganz unbestimmt. Am stärksten wird sich das Potential der Zinkplatte geändert haben, weniger das der Kupferplatte, am wenigsten wohl jenes der Metalle am Elektroskop, weil dort die Bedingungen für eine Condensation während der Berührung am ungünstigsten waren. Bringen wir jetzt die Metallplatten zur Berührung, so wird ihre Potentialdifferenz wiederum die normale z/k werden, die absolute Höhe ihrer Potentiale aber ist unbestimmt. Nach der Trennung wächst die Differenz, und bringen wir nun eine der Platten, z. B. das Zink, in Berührung mit der Kugel des Elektroskops, so werden wohl im selben Moment die Potentialdifferenzen der Metalle Zink und Messing, Messing und Gold $= z/m$, m/g, aber die absoluten Werthe der Potentiale sind wieder unbestimmt und ebenso unbestimmt ist die nach Entfernung der Zinkplatte zurückbleibende Potentialhöhe der Goldblättchen, sowie die Ladung des Elektroskops überhaupt. Die letztere hängt offenbar ab von der Art und Weise, wie

Fig. 285.



die Zink- und die Kupferplatte von der ableitenden Tischplatte abgehoben und von einander getrennt wurden und wie das Elektroskop ursprünglich zur Tischplatte abgeleitet und von der Zinkplatte getrennt wurde.

Wenn man das Alles bedenkt und erwägt, dass es sich dabei überdies um minimale Wirkungen handelt, so darf man sich nicht wundern, dass so viele Versuche über Contactwirkung, bei denen diese Umstände unberücksichtigt blieben, zu widersprechenden Resultaten geführt haben. Wir sehen nun auch ein, dass es durch einfache Ableitung nicht gelingen kann, einen Leiter auf das Potential Null, oder auch nur mehrere verschiedene Leiter auf dasselbe Potential zu bringen. Dies ist nur möglich durch Einführung des Leiters in eine zur Erde abgeleitete Hülle aus demselben Material, an welche der Leiter bei der Berührung jede Ladung abgeben muss (§. 56). Innerhalb der Hülle hat er das Potential derselben, welches er dann beim Herausnehmen verliert. Jedes durch Berührung mit Finger oder Draht zur Erde abgeleitete Elektroskop hat daher schon eine Ladung, welche aber zu schwach ist, um die Goldblättchen zur Divergenz zu bringen. Aus diesem Grunde kann

auch durch das blosse Aufsetzen einer Zinkplatte auf die Kupferplatte des Elektroskops keine merkliche Divergenz bewirkt werden (§. 99, Versuch 1). Eine solche ist beim Goldblattelektroskop immer nur möglich durch Multiplication des Potentials mittelst Capacitätsverminderung, wie sie durch Anwendung des Condensators stattfindet.

Wir können jetzt auch eine Modification des S. 333 beschriebenen Versuchs mit der Volta'schen Doppelplatte (Fig. 276) erklären. Fasst man die letztere statt mit der Hand mittelst einer isolirenden Zange am Zinkende und berührt mit ihrem Kupferende die untere kupferne Platte des Condensators, zugleich die obere Platte aus Zink mit der Hand, so zeigt sich nach dem Abheben keine Divergenz, während eine solche stattfindet, wenn die Doppelplatte in der Hand gehalten wurde. Die Erklärung ist folgende: Durch die Verbindung mit dem Condensator wird die Kupferseite der Doppelplatte in ihrer Capacität sehr vergrössert, während die Capacität des Zinks nur klein bleibt. Nun vertheilt sich aber die Potentialdifferenz nach §. 102 im verkehrten Verhältnisse zu den Capacitäten. Es wird daher das Zink fast allein in seinem Potential erhöht, das Kupfer nur so wenig erniedrigt, dass selbst die darauf folgende Capacitätsverminderung durch Abheben der Platte keine Wirkung auf das Elektroskop zu bewirken vermag; denn es ist dann die Capacität des Kupfers immer noch grösser als die des Zinks. Wird dagegen das Zink abgeleitet, d. h. auf die Capacität ∞ gebracht, so erhält das Kupfer eine der ganzen Potentialdifferenz entsprechende Erniedrigung, welche dann durch den Condensator vergrössert am Elektroskop bemerkbar wird.

Fr. Exner, welcher zuerst darauf hingewiesen hat, dass nach der Contacttheorie jeder zur Erde abgeleitete Leiter elektrisch sein müsse, versuchte aus diesen Consequenzen einen Beweis gegen die Contacttheorie abzuleiten*). Er brachte eine Vorrichtung, wie sie im §. 68 beschrieben und in Fig. 175 abgebildet erscheint, mit dem Quadrantenelektrometer und mit der Erde in leitende Verbindung und beobachtete nach Aufhebung der Ableitung zur Erde, ob das Aufwickeln des Stanniolblattes eine Aenderung des Potentials zur Folge hatte. Da beim Aufwickeln die Capacität bedeutend verkleinert, also das Potential vervielfacht werden müsste, so hätte das Elektrometer einen Ausschlag geben müssen, falls das Zinn des Stanniols in Berührung mit der Erde ein von Null verschiedenes Potential angenommen hat. Es wurde kein solcher Ausschlag beobachtet. Andere Metalle gaben zwar Ausschläge, welche Exner aber nur ihrer Reibung beim Auf- und Abwickeln zuschrieb. Bei späteren Versuchen**) wurde die Capacität des isolirten Leiters dadurch geändert, dass man demselben eine zweite Platte desselben Materials näherte oder dieselbe aus der Nähe entfernte. Auch diese Versuche

*) Wien. Akad. Ber. LXXXVI, 551, 1882.

**) Ebend. XCV, 595, 1887.

liessen keine Ladung erkennen. Diese Ergebnisse sind im Widerspruche mit den, wie uns scheint, ganz einwurfsfreien Messungen der Contactpotentialdifferenzen, welche, wie oben mitgetheilt, Hallwachs*) mittelst des Quadrantenelektrometers angestellt hat. Da auch eine Controverse über den Capacitätsversuch Exner's zwischen diesem**), Hallwachs***), Götz und Kurz†) zu keiner definitiven Klärung geführt hat, so müssen wir den Leser vorderhand auf die angegebene Literatur verweisen.

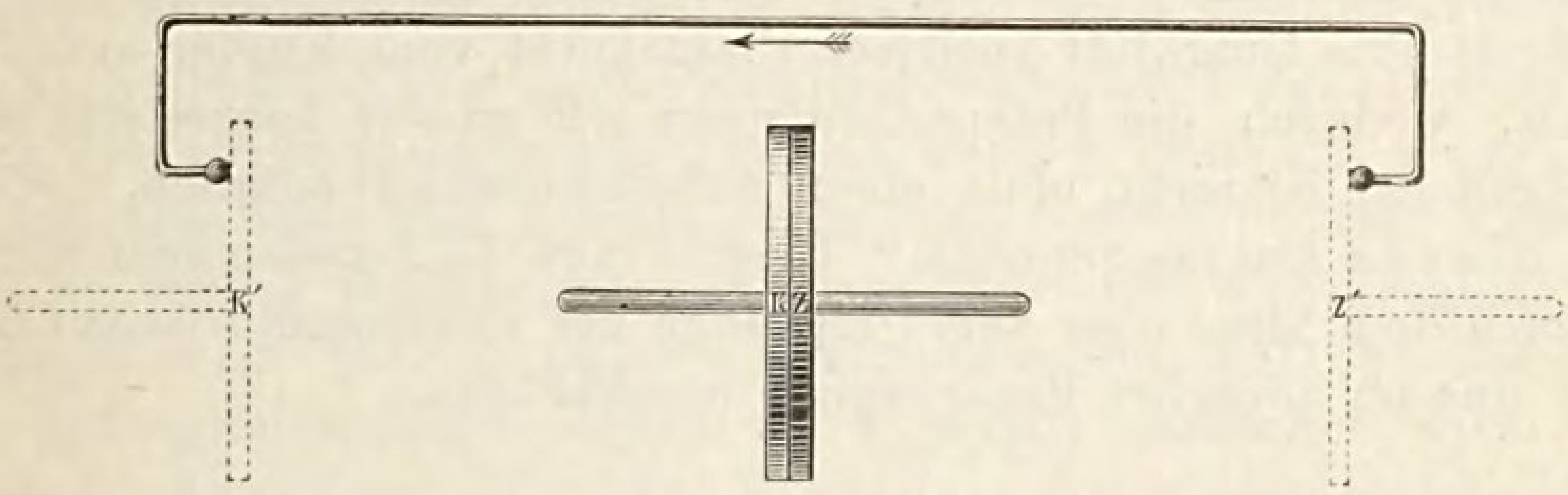
106 **Der Contactversuch vom Standpunkte der Erhaltung der Energie.** Die Erwägungen der vorausgehenden Paragraphen, welche uns zu dem Schlusse führten, dass in jedem Systeme unter sich irgendwie verbundener Leiter erster Classe, jedem Leiter derselben Art auch immer dasselbe relative Potential zukomme, welches ihm durch Berührung mit anderen nicht genommen werden kann; diese Erwägungen sind im engsten Zusammenhange mit der Frage, wie sich der Contactversuch mit dem Gesetze der Erhaltung der Energie vertrage. Wäre, wie man früher wohl glaubte, ein sich berührendes Paar heterogener Leiter als eine Art unerschöpflicher Franklin'scher Tafel anzusehen, welche aus eigener Kraft ihre Ladungen immer wieder erneuert, so oft man dieselben durch alternirende Ableitung der Platten entführt, so würde dies mit dem Gesetze der Erhaltung der Energie ganz unverträglich sein. Denn da wir mittelst der alternirenden Entladungsströme Wärme oder mechanische Arbeit erzeugen könnten, so würden wir Energie aus Nichts zu erzeugen vermögen. Bei näherer Untersuchung zeigt sich, dass eine solche Entladung entweder nicht gelingt, oder dass, wo sie gelingt, dabei eine anderweitige Energie mit ins Spiel kommt.

Wir denken uns eine Zink- und Kupferplatte mit einander in Berührung. Von der Erde gehe ein Kupferdraht aus, dessen oberes Ende wir zunächst mit dem Kupfer in Berührung bringen. Wir haben dann eine Kette von der Zusammensetzung Erde, Kupfer, Zink. Betrachten wir zunächst die Erde als einen Leiter erster Classe, so kommt jedem Gliede dieser Kette sein specifisches Potential zu. Wir wollen das der Erde mit 0, die anderen beiden mit k, z bezeichnen. Eine Entladung der Kupferplatte durch den Kupferdraht ist demnach nicht möglich; aber auch nicht der Zinkplatte, denn da zwischen dieser und dem Kupferdraht bereits dieselbe Potentialdifferenz k/z herrscht, welche sie bei der Berührung annehmen würden, so ist kein Ueberströmen von Elektricität möglich. Aber auch mit einer Drahtleitung aus irgend einem anderen Leiter ist keine Ableitung möglich; denn nehmen wir z. B. einen Eisen-

*) Wiedem. Ann. XXIX, S. 1, 1886.
**) Ebend. XXXII, S. 515, 1887.
***) Ebend. XXXII, S. 64, 1887.
†) Centralblatt f. Elektrotechnik 1887, S. 273; 1888, S. 10.

draht, so hat derselbe in Berührung mit der Erde sein specifisches Potential ε angenommen und wenn wir sein oberes Ende mit dem Kupfer oder dem Zink in Verbindung bringen, so herrscht dort überall schon vor der Berührung jene Potentialdifferenz ε/k, beziehungsweise ε/z, welche nach der Berührung bestehen bleibt. Das Gleichgewicht der elektrischen Anordnung bleibt also ungestört. Auch durch gleichzeitige Berührung beider Metalle mit zwei beliebigen von der Erde ausgehenden Drähten wäre keine Entladung möglich. Eine Störung des Gleichgewichts, also ein Ueberfliessen von Elektricität von den Platten auf die Drähte, wird aber möglich, wenn die Erde (oder das auf ihr vorfindliche Wasser) nicht als Leiter erster Classe, sondern als solcher zweiter Classe fungirt, welcher sich dem Gesetze der Spannungsreihe nicht unterordnet und welcher dabei chemische Veränderungen erleidet. Sowie aber dieses geschieht, so haben wir in der verbrauchten Energie der chemischen

Fig. 286.



Vorgänge das Aequivalent für die scheinbar aus Nichts gewonnene Energie der elektrischen Strömung zu suchen. Dasselbe wäre bei der Ableitung mittelst des menschlichen Körpers der Fall.

Nun wollen wir aber eine andere Versuchsanordnung in Betracht ziehen, wo wirklich die Contactelektricität von den Platten abgeführt und zur Erzeugung eines Stromes, indirect zur Erzeugung von Wärme oder mechanischer Arbeit, verwendet werden kann. Die Kupfer- und die Zinkplatte, Fig. 286, werden an den isolirenden Stielen gefasst, in horizontaler Richtung von einander getrennt und entfernt, bis sie beide an die umgebogenen Enden des daneben ausgespannten Kupferdrahtes anstossen. Hierauf werden sie wieder einander genähert und nach Berührung neuerdings getrennt und so fort. Da bei der Trennung die Capacität der Platten sehr verkleinert wird, so wächst die Potentialdifferenz weit über den Werth k/z; beim Anstossen an die Drahtenden müssen daher an diese erhebliche Mengen entgegengesetzter Elektricitäten abgegeben werden und es muss dadurch im Draht eine intermittirende Strömung positiver Elektricität in der Richtung des Pfeiles entstehen, welche daselbst in Wärme verwandelt wird und mit Hülfe anderweitiger Vorkehrungen (Elektromagnete) in mechanische Arbeit umgesetzt werden könnte.

Da die Platten hierbei nur horizontalen Transport erfahren und wir uns die Reibung nicht vorhanden oder verschwindend klein denken

können, so scheint es, als ob Energie aus Nichts gewonnen und das Perpetuum mobile erfunden wäre. Dabei hätten wir aber übersehen, dass wir zur Entfernung der in Berührung gewesenen Platten mehr Arbeit aufwenden müssen, als bei der Wiederannäherung gewonnen wird, weil in Folge der Condensatorwirkung die Platten nach ihrer gegenseitigen Berührung mehr Ladung enthalten, als nach der Berührung mit den Drahtenden. Dieser Mehraufwand von Arbeit ist das Aequivalent für die im Draht erzeugte Wärme, ganz so wie bei der Influenzmaschine durch die Arbeit des Experimentators, der ihre Kurbel dreht, die Energie ihrer elektrischen Strömung gewonnen wird.

So ist es in allen ähnlichen Fällen. Die Capacitätsverkleinerung erfordert Energiezufuhr von aussen. Eines bleibt aber damit noch unaufgeklärt. Sobald wir die Kupfer- und Zinkplatte in Berührung bringen, was (theoretisch) ohne fremden Arbeitsaufwand möglich ist, so wird durch die Erhöhung der Capacität die vorhandene Potentialdifferenz z/k momentan vermindert und sofort durch die elektromotorische Kraft eine Quantität positiver Elektricität vom Kupfer aufs Zink getrieben, wodurch die Potentialdifferenz z/k wieder hergestellt wird. Diese Strömung ist nicht ohne einen Arbeitsaufwand möglich. Woher stammt dieses Energiequantum? Diese Frage fällt zusammen mit der Frage nach dem Sitze oder dem Ursprunge der elektromotorischen Kraft und soll uns im nächsten Paragraphen beschäftigen.

107 **Ursprung und Sitz der elektromotorischen Kraft bei der Berührung heterogener Leiter erster Ordnung.** Es giebt wohl kaum einen Gegenstand der Physik, über welchen so viel gearbeitet und geschrieben wurde, wie über die Frage nach dem Ursprunge der Contactelektricität. Trotzdem gehen noch heute nicht allein die theoretischen Ansichten über die Deutung der Versuchsresultate auseinander, sondern es begegnen sich selbst über das Thatsächliche derselben widersprechende Behauptungen.

Nach Volta wäre die Berührung der heterogenen Metalle selbst die Ursache der elektromotorischen Kraft. Diese Theorie heisst die Contacttheorie. Da, wie wir im vorigen Paragraphen hervorgehoben haben, die blosse Entstehung einer Potentialdifferenz, auch wenn keine continuirliche Strömung daraus hervorgehen kann, einen Arbeitsaufwand voraussetzt, so muss man weiter fragen, wieso die Berührung der Metalle die dazu nöthige Kraft liefern soll. Hierauf giebt eine Theorie von v. Helmholtz Antwort, welche dieser Physiker zuerst in seiner berühmten Schrift „Die Erhaltung der Kraft“ *) mitgetheilt hat. Nach dieser Theorie übt die Materie der heterogenen Leiter eine Anziehung auf die Elektricitäten aus, welche nicht allein bei verschiedenen Leitern verschieden gross, sondern auch verschieden stark ist, je nach der Art

*) Berlin 1847, S. 47.

der Elektricität. Diese Theorie steht also zunächst auf dem dualistischen Standpunkte, dürfte aber wohl auch auf die unitarische Ansicht übertragbar sein. Diese Anziehung wirkt nur auf unmessbar kleine Entfernungen. Angenommen, das Kupfer ziehe die negative Elektricität, das Zink die positive Elektricität stärker an, so wird dadurch negative Elektricität auf das Kupfer, positive auf das Zink getrieben, und zwar so lange, bis die Anziehungskräfte der entgegengesetzten Elektricitäten auf einander mit jenen der Metalle auf die Elektricitäten ins Gleichgewicht kommen.

Die Unabhängigkeit der elektromotorischen Kraft von der Grösse und Ausdehnung der sich berührenden Leiter ergiebt sich aus der Annahme, dass die Anziehungen zwischen der Materie des Leiters und den Elektricitäten nur auf unmessbare (moleculare) Entfernung wirken.

Dieser in Deutschland am meisten Anhänger zählenden Contacttheorie steht die von De la Rive stammende, in neuerer Zeit von Fr. Exner wesentlich modificirte chemische Theorie gegenüber.

Nach De la Rive ist der Fundamentalversuch auf folgende Weise zu erklären: Alle metallischen Flächen werden stets mit einer dünnen condensirten Gas- und Feuchtigkeitsschicht umhüllt sein, welche auf dieselben ebenso elektromotorisch wirkt, wie eine Wasserschicht. Eine Zinkplatte wird dadurch negativ elektrisch erregt, während die condensirte Flüssigkeitsschicht ebenso stark positiv elektrisch wird. Nach aussen hin kann diese elektrische Vertheilung direct nicht wahrgenommen werden, weil die erregten entgegengesetzten Elektricitäten unmittelbar neben einander gebunden sind.

Setzt man eine solche elektrisch erregte Zinkplatte auf eine Kupferplatte, so berühren sich die Platten, wie gut sie auch abgeschliffen sein mögen, doch nur in einzelnen Punkten, so dass die condensirte Gas- und Feuchtigkeitsschicht die Platten bis auf die wenigen Berührungspunkte trennt.

Da die Kupferplatte durch ihre Feuchtigkeitsschicht weit schwächer negativ erregt wird als die Zinkplatte, so tritt ein Theil der negativen Elektricität an den Berührungspunkten direct auf die Kupferplatte über und wenn nun die Zinkplatte abgehoben wird, so erweist sich die Kupferplatte negativ elektrisch, während die Zinkplatte mit ihrer Gasschicht die in letzterer befindliche, jetzt zum Theil frei gewordene positive Elektricität bewahrt.

Nach De la Rive kommen also auch beim Fundamentalversuch mit Leitern erster Ordnung ohne unsere Absicht Leiter zweiter Ordnung mit ins Spiel. Da dieselben chemische Reactionen hervorrufen, so liefern die Affinitätskräfte die zur Herstellung der Potentialdifferenz nöthige Arbeit.

Ist diese Erklärung richtig, so dürfen heterogene Metalle im Vacuo bei der Berührung keine Elektricität entwickeln. Dies wurde nun auch

von De la Rive behauptet, aber von Pfaff, Fechner u. A. sowie neuestens von W. v. Zahn*) in Abrede gestellt.

Nach Fr. Exner**) ist der Volta'sche Fundamentalversuch ohne Annahme einer Contactwirkung folgendermaassen zu erklären:

Alle oxydirbaren Metalle überziehen sich an der Luft in kürzester Zeit mit einer dünnen Oxydschicht. Bei dieser Oxydation wird Verbrennungswärme erzeugt, ausserdem ein gewisses Quantum positiver und negativer Elektricität. Diese beiden Effecte zusammen sind äquivalent der verbrauchten chemischen Energie. Die erzeugte positive Elektricität geht auf das Oxyd über, die negative auf das Metall; diese Ladungen entsprechen den Potentialen $+ V$ und $- V$. Da die Oxydschicht ein ausgezeichneter Isolator ist, so haftet die Elektricität fest an derselben und es ist weder eine Neuvertheilung, noch eine Ableitung derselben möglich. Die negative Elektricität des Metalls wird, wenigstens zum grossen Theil, an der Trennungsfläche gebunden, zum Theil über das ganze Metall verbreitet sein. Eine Wirkung nach aussen, wenigstens auf Leiter, welche verhältnissmässig grossen Abstand haben, kann dann nicht eintreten, da sich die Wirkungen der entgegengesetzten Elektricitäten gegenseitig aufheben. Bringt man aber das Metall mit der Erde in leitende Verbindung, so nimmt es das Potential Null an, wenngleich seine negative Ladung nach wie vor zum grössten Theil gebunden bleibt. Auf einen in der Nähe befindlichen Leiter wird das System aber jetzt wirken, wie eine Metallplatte vom Potential $+ V$, da nämlich jetzt das Potential in der Oxydschicht zur Wirkung gelangt. Ist der Oxydationsprocess einmal vollendet, was in der Regel der Fall sein wird, und war die Platte schon einmal zur Erde abgeleitet, so bleibt der eben beschriebene elektrische Zustand stationär, so lange man nicht das Metall auf ein anderes Potentialniveau bringt. Die Dichte der Elektricität auf und in der Oxydschicht ändert sich aber in keinem Falle, da diese als vollkommener Isolator gilt.

Betrachten wir nun den Fall, dass man einer oxydirten und isolirten Zinkplatte eine isolirte (nicht oxydirte) Platinplatte nähert. Beide Platten seien vorher abgeleitet gewesen. Das Platin erhält nun durch Influenz ein positives Potential, das Zink ein negatives, denn es wird im Platin negative Elektricität gebunden und positive frei; im Zink dagegen wird ein gleicher Betrag der vorher von der positiven Oxydschicht gebundenen negativen Elektricität frei. Verbindet man beide Metalle durch einen Draht, so gleichen sich diese freien Elektricitäten aus und beide Platten sind wieder auf dem Potential Null. Während der Condensator geschlossen ist, existirt also nur an der Grenze von Zink und Zinkoxyd eine Potentialdifferenz, die beiden Metalle aber befinden sich

*) Untersuchungen über Contactelektricität. Leipzig 1882.
**) Wien. Akad. Ber. LXXXI.

auf dem Potential der Erde, weshalb es auch gleichgültig ist, ob der Schliessungsdraht isolirt oder abgeleitet ist. Unterbricht man nun die Schliessung und entfernt beide Platten von einander, so erhält nun das Platin eine Ladung freier negativer Elektricität. Das Zink dagegen enthält weniger negative Elektricität, als im neutralen Zustande von der Oxydschicht gebunden wird, und erscheint daher in gleichem Grade positiv, wie das Platin negativ.

Bestehen beide Platten aus oxydirbaren Metallen, so dass dem einen Oxyd das Potential $+ V$, dem anderen $+ v$ zukommt, so entspricht die Ladung des Condensators der Differenz $V - v$.

Nach dieser Theorie müsste bei blosser Annäherung ohne Berührung verschiedener Metallplatten eine elektrische Vertheilung eintreten. Fr. Exner hat auch Versuche mitgetheilt, nach welchen dies thatsächlich der Fall wäre. Eine weitere Stütze schien Exner durch eine von ihm aufgefundene Proportionalität zwischen Potentialdifferenz und Verbrennungswärme zu erhalten. Wie wir bereits bemerkt, verhält sich die Mehrzahl der deutschen Physiker dieser Theorie gegenüber ablehnend, indem sie theils das Thatsächliche der zu Grunde liegenden Versuche bestreiten, theils diesen letzteren eine mit der Contacttheorie vereinbare Deutung geben. Ueber den Einwurf, welchen Fr. Exner auf Grund seines Capacitätsversuches gegen die Contacttheorie erhoben hat, wurde oben berichtet*).

Wir möchten uns trotzdem der chemischen, auch von W. Ostwald**) vertretenen Theorie anschliessen. Dass die Luft gegenüber den Metallen eine ähnliche Rolle wie ein Leiter zweiter Ordnung spielt, scheint ein sehr beachtenswerther Versuch von J. Brown***) zu beweisen. Ersetzt man nämlich bei dem S. 333 erwähnten Versuche von W. Thomson die Luft durch andere Gase, so ändert die Aluminiumnadel die Grösse und die Richtung ihres Ausschlages.

Die Volta'sche Säule. Nachdem Volta die Elektricitäts- 108
erregung bei der Berührung heterogener Leiter entdeckt hatte, war er bestrebt, die elektrische Spannung durch Combination von einzelnen Erregerpaaren zu vervielfachen. Es gelang dies schliesslich seinem Scharfsinne durch Herbeiziehung der Leiter zweiter Ordnung. Es ist nämlich sofort einzusehen, dass es ausschliesslich mit Leitern der ersten Ordnung nie möglich sein kann, die elektromotorische Wirkung von Plattenpaaren durch Vermehrung derselben zu vervielfachen. Denn

*) Auf die Versuche, die Contactwirkung der Metalle aus deren thermoelektrischem Verhalten abzuleiten (Edlund, Le Roux), kommen wir später zu sprechen; im Uebrigen verweisen wir auf die in Wiedemann's Lehre von der Elektricität, II, S. 985 gegebene Zusammenstellung der neueren Versuche über Contactelektricität und den gegenwärtigen Standpunkt dieser Frage.

**) Lehrb. der allgem. Chemie, II., S. 481.

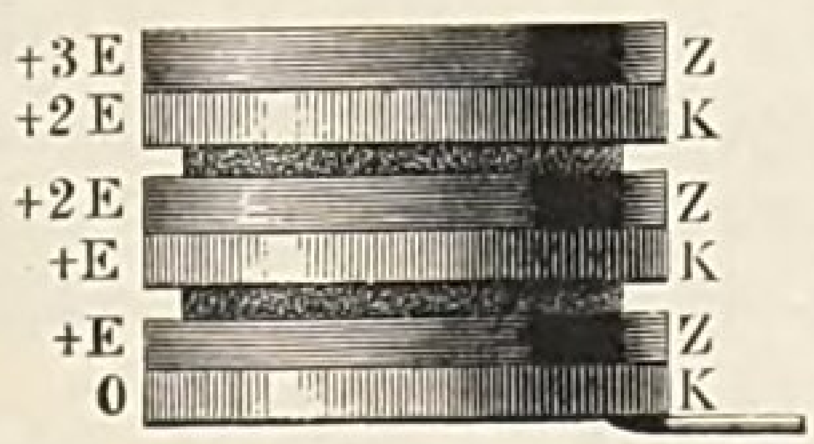
***) Phil. Mag. (5) 7, 109, 1879.

denken wir uns z. B. eine Anzahl von Zink- und Kupferplatten so auf einander geschichtet, dass zu unterst eine Zinkplatte liegt, dann eine Kupferplatte folgt und so fort die Metalle wechselnd auf einander folgen, bis zuletzt eine Kupferplatte die Säule abschliesst, so wirkt eine solche Kette, wie wir im §. 103 erkannt haben, stets nur so, als ob die Endmetalle allein vorhanden wären. Alle Zwischenleiter erster Ordnung haben keinerlei Einfluss auf die Potentialdifferenz, beziehungsweise Spannungsdifferenz der Enden der Kette. Volta, von seiner Ansicht ausgehend, dass die flüssigen Leiter nur als Leiter fungiren, aber selbst keine elektromotorische Kraft beim Contact mit Metallen entwickeln, versuchte nun, die positive Elektricität jedes Kupfer-Zinkpaares durch eine mit angesäuertem Wasser getränkte Tuchscheibe dem nächsten Kupfer-Zinkpaare zuzuführen, indem er eine Kette aufbaute, die, wie Fig. 287 zeigt, von unten nach oben nach dem Schema:

Kupfer - Zink - Wasser, Kupfer - Zink - Wasser - Kupfer - Zink . . .

zusammengesetzt war. Eine solche Kette wird eine Volta'sche Säule und ihre Endstücke werden ihre Pole genannt.

Fig. 287.



Die einzelne Combination aus Kupfer, Zink und Flüssigkeit heisst ein Volta'sches Element.

Angenommen, das Wasser fungire wirklich nur als Leiter und die elektromotorische Kraft zwischen Zink und Kupfer sei $= + 2\,e$, wofür wir der Kürze wegen $+E$ setzen wollen, so wird, wenn wir die unterste Kupferplatte mit dem Erdboden verbinden, die nächste Zinkplatte das Potential $+E$ erhalten, dieses wird auf das nächste Kupfer und durch dessen Berührungsfläche hindurch zum nächsten Zink übertragen. Letzteres hat selbst $+ E$ erhalten, so dass also nun $+ 2\,E$ weiter übertragen werden. Jede Berührungsfläche zwischen Kupfer und Zink vermehrt das Potential um die Grösse $+ E$. Sind also im Ganzen n solcher Berührungsflächen vorhanden, so ist das Potential am oberen Ende der Säule nE. Wirklich fand Volta die Spannung von n Elementen, wie man die Combination der beiden Metallscheiben mit einer Tuchscheibe zu nennen pflegt, n mal so gross als jene eines Elementes.

Dennoch beging Volta einen Irrthum, indem er die elektromotorische Einwirkung der Flüssigkeit übersah. Im Besitze des in dem vorigen Paragraphen Vorgetragenen können wir leicht die vervollkommnete Erklärung der Wirksamkeit der Volta'schen Säule aufstellen. Bezeichnen wir die Potentialdifferenzen Zink | Kupfer, Wasser | Zink und Wasser | Kupfer mit $2\,e$, $2\,\varepsilon$, $2\,\varepsilon'$, so haben wir für den elektrischen Zustand einer Säule von drei Elementen, deren unteres Ende abgeleitet ist, folgendes Schema:

$$\begin{array}{ll}
\text{Kupfer} & +2e+2\varepsilon-2\varepsilon'+2e+2\varepsilon-2\varepsilon'+2e+2\varepsilon-2\varepsilon'=3E \\
\text{Wasser} & +2e+2\varepsilon-2\varepsilon'+2e+2\varepsilon-2\varepsilon'+2e+2\varepsilon \\
\text{Zink} & +2e+2\varepsilon-2\varepsilon'+2e+2\varepsilon-2\varepsilon'+2e \\
\text{Kupfer} & +2e+2\varepsilon-2\varepsilon'+2e+2\varepsilon-2\varepsilon'=2E \\
\text{Wasser} & +2e+2\varepsilon-2\varepsilon'+2e+2\varepsilon \\
\text{Zink} & +2e+2\varepsilon-2\varepsilon'+2e \\
\text{Kupfer} & +2e+2\varepsilon-2\varepsilon'=E \\
\text{Wasser} & +2e+2\varepsilon \\
\text{Zink} & +2e \\
\text{Kupfer} & \quad 0
\end{array}$$

Wir beginnen mit dem Aufbau des Schemas von unten, indem wir bei jedem Gliede eine neue elektrische Differenz hinzufügen. Die Grösse $2e + 2\varepsilon - 2\varepsilon'$, das ist die Summe der Potentialdifferenzen eines Elementes, bezeichnen wir abgekürzt mit E. Würde man die Säule am oberen Ende ableiten, so wäre am unteren Ende die Spannung $-3E$.

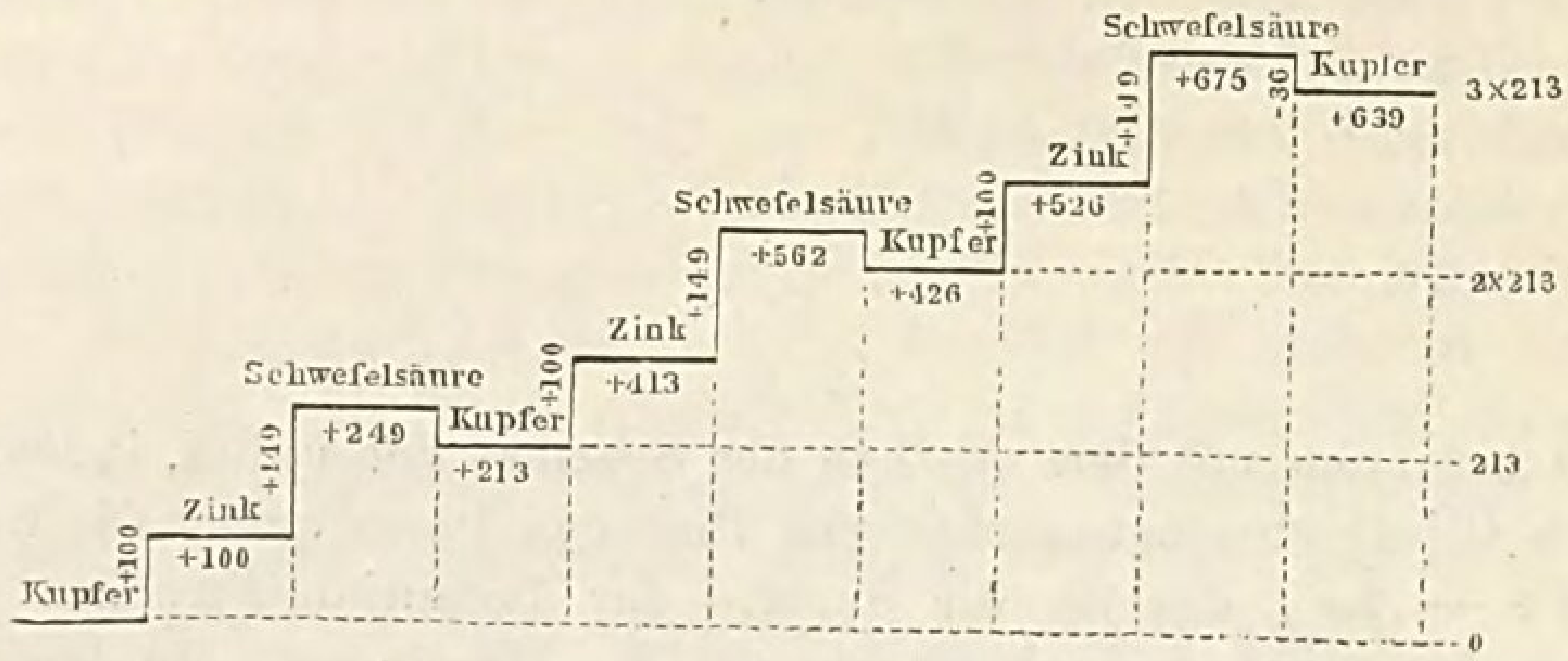
Für den Fall, dass die Säule allseitig isolirt ist, erhält man unschwer das folgende Schema des elektrischen Zustandes:

$$\begin{array}{ll}
\text{Kupfer} & +e+\varepsilon-\varepsilon'+e+\varepsilon-\varepsilon'+e+\varepsilon-\varepsilon'=3\dfrac{E}{2} \\
\text{Wasser} & +e+\varepsilon-\varepsilon'+e+\varepsilon-\varepsilon'+e+\varepsilon+\varepsilon' \\
\text{Zink} & +e+\varepsilon-\varepsilon'+e+\varepsilon-\varepsilon'+e-\varepsilon+\varepsilon' \\
\text{Kupfer} & +e+\varepsilon-\varepsilon'+e+\varepsilon-\varepsilon'-e-\varepsilon+\varepsilon'=\dfrac{E}{2} \\
\text{Wasser} & +e+\varepsilon-\varepsilon'+e+\varepsilon+\varepsilon'-e-\varepsilon+\varepsilon' \\
\text{Zink} & +e+\varepsilon-\varepsilon'-e+\varepsilon+\varepsilon'-e-\varepsilon+\varepsilon' \\
\text{Kupfer} & +e+\varepsilon-\varepsilon'-e-\varepsilon+\varepsilon'-e-\varepsilon+\varepsilon'=-\dfrac{E}{2} \\
\text{Wasser} & +e+\varepsilon+\varepsilon'-e-\varepsilon+\varepsilon'-e-\varepsilon+\varepsilon' \\
\text{Zink} & +e-\varepsilon+\varepsilon'-e-\varepsilon+\varepsilon'-e-\varepsilon+\varepsilon' \\
\text{Kupfer} & -e-\varepsilon+\varepsilon'-e-\varepsilon+\varepsilon'-e-\varepsilon+\varepsilon'=-3\dfrac{E}{2}.
\end{array}$$

Die Potentialdifferenz an beiden Enden der Säule ist auch diesmal $= 3\frac{E}{2} - \left(-3\frac{E}{2}\right) = 3E$, wie früher; das Potential an den Enden ist aber nur halb so gross und entgegengesetzten Zeichens. Würden wir die Säule an irgend einer Stelle zwischen den Enden ableiten, so würde sie wirken wie zwei Säulen, die mit abgeleiteten entgegengesetzten Polen zusammenstossen. Die hier gegebene Erklärung der Säule unterscheidet sich also von jener Volta's nur dadurch, dass wir unter E die algebraische Summe aller drei elektromotorischen Kräfte zusammenfassen, während Volta nur die zwischen Zink und Kupfer als wirksam annahm.

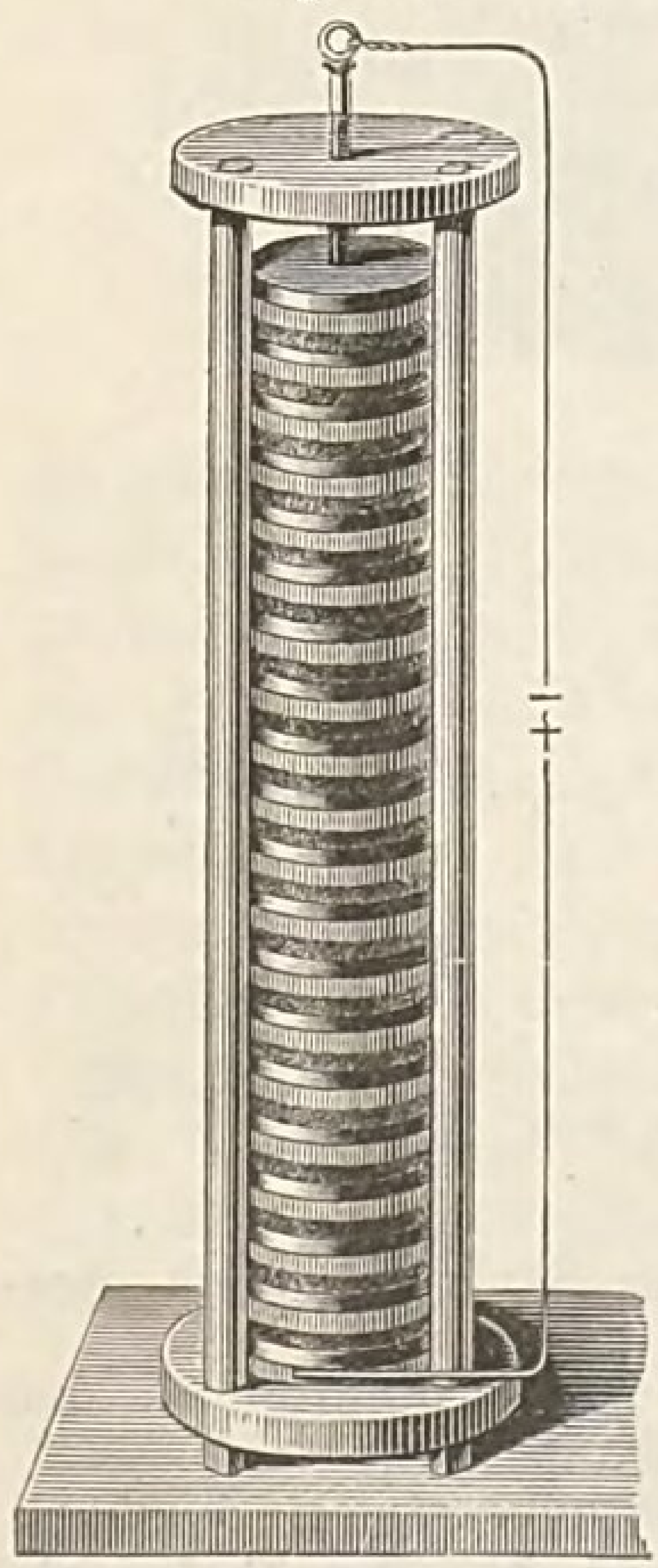
Auch hier erhalten wir eine bessere Uebersicht über die Höhe des Potentials auf den einzelnen Bestandtheilen der ganzen Kette, wenn wir die Potentialdifferenzen durch Ordinaten darstellen. Fig. 288 zeigt

Fig. 288.



ein solches Schema für drei Volta'sche Elemente, deren negativer Pol abgeleitet ist. Setzt man (im Sinne der Contacttheorie) die elektromotorische Kraft Zink | Kupfer = + 100, so ist jene von Schwefelsäure | Zink ungefähr + 149, Kupfer | Schwefelsäure = — 36. Die elektromotorische Kraft eines ganzen Elementes Kupfer-Zink - Schwefelsäure - Kupfer ist also = 100 + 149 — 36 = + 213; die elektromotorische Kraft einer Kette von drei Elementen = 3 × 213 = 639. Aus der Fig. 288 lässt sich sofort erkennen, welche Potentialwerthe die Enden der Kette annehmen würden, wenn man irgend ein Glied der Kette ableiten würde*).

Fig. 289.



Die Volta'sche Säule wurde in Bezug auf ihre äussere Form und auf die Wahl der Metalle und der Flüssigkeit mannigfach abgeändert. Ihre ursprüngliche Form ist aus Fig. 289 zu ersehen. Die Metall- und Tuchscheiben sind zwischen drei Glasstäbchen aufgeschichtet. Es ist vortheilhaft, die Kupfer- und Zinkscheiben zuzammenzulöthen. Aus früher erörterten Gründen kann das dazwischen befindliche Löthmetall keinen Einfluss haben.

*) Aus den während des Druckes erschienenen Messungen, welche W. Ostwald (Zeitschr. f. physik. Chemie I, S. 583) mittelst des Quecksilbertropfcollectors angestellt hat, geht hervor, dass die Potentialdifferenz Schwefelsäure | Zink = — 0,700 Volt, jene Schwefelsäure | Kupfer = + 0,364 Volt ist, so dass also diese beiden Potentialdifferenzen im selben Sinne stromerregend wirken.

Da das Herabfliessen der Flüssigkeit an den Seiten der Säule störend ist, so empfiehlt es sich, die Kupferplatten mit einem aufstehenden Rande zu versehen. Später hat man die Form der Säule ganz verlassen, trotzdem aber ihren Namen auch für solche Ketten beibehalten, welche eine ganz abweichende äussere Form besitzen.

An einer Volta'schen Säule kann man nun leicht die Spannungserscheinungen nachweisen, indem man ihre Pole mit einem Elektroskop verbindet, oder auch die Säule an den Polen oder in der Mitte mit einem Probescheibchen berührt und dessen Ladung mit dem Elektroskop prüft. Besonders gut eignet sich das Thomson'sche Quadrantenelektrometer zu solchen Versuchen. Besteht die Säule aus mehr als 40 Plattenpaaren, so giebt ihre Entladung bereits fühlbare physiologische Wirkungen. Um dieselben zu erhalten, berührt man mit befeuchteten Handflächen gleichzeitig ihre beiden Pole. Noch auffallender ist die Wirkung, wenn man die beiden Poldrähte in die Mundwinkel oder an die Augen führt. Die Experimente mit der geschlossenen Säule werden wir später besprechen.

Um einem Missverständniss vorzubeugen, wollen wir noch darauf aufmerksam machen, dass die Säule nicht nothwendig mit zwei Kupferplatten, wie im Schema S. 358 angenommen wurde, schliessen muss. Man lässt häufig die unterste Kupferplatte fort, wodurch die elektrische Differenz der offenen Säule allerdings um $2e$ vermindert wird. In diesem Falle ist dann der Zinkpol der negative Pol und der Kupferpol der positive Pol. Würde man dagegen die Säule nach diesem Schema unten mit der Kupferplatte, oben mit der Zinkplatte schliessen, so würde umgekehrt das Zink den positiven, das Kupfer den negativen Pol bilden. Das Zeichen des Pols hängt also nicht davon ab, mit welchem Metalle man zufällig die Säule enden lässt, sondern davon, in welcher Ordnung die Metalle und die Flüssigkeit auf einander folgen.

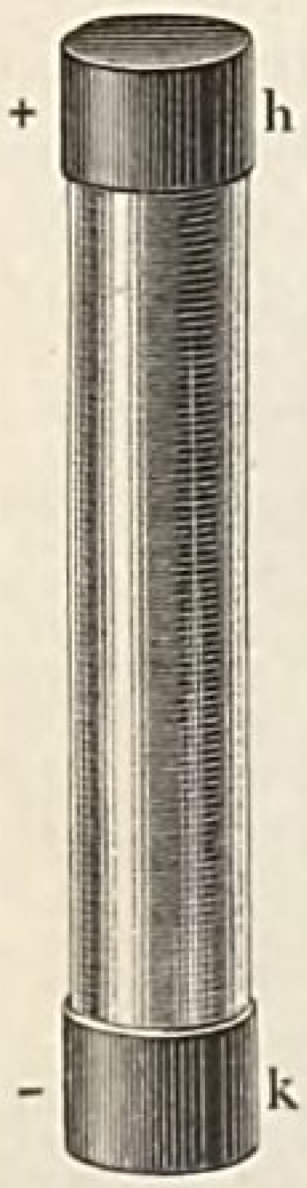
Die trockene Säule. Ganz nach dem Princip der Volta'schen hat Behrens eine Säule construirt, in welcher der feuchte Leiter durch eine Papierscheibe ersetzt ist, und welche deshalb die trockene Säule genannt wird, obwohl dieselbe stets etwas Feuchtigkeit enthalten muss, wenn sie wirksam sein soll. Häufig wird diese Säule auch nach Zamboni benannt, der sich mit ihr beschäftigt hat. Man construirt die trockenen Säulen am bequemsten aus unechtem Gold- und Silberpapier: man klebt mit Kleister einen Bogen unechten Silberpapiers (Zinn) und einen Bogen unechten Goldpapiers (Kupfer) mit den Papierseiten zusammen, so dass man ein Papierblatt hat, welches auf der einen Seite mit Kupfer, auf der anderen mit Zinn überzogen ist. Mehrere solcher Blätter werden auf einander gelegt und mittelst eines stählernen Durchschlagers Scheibchen ausgeschlagen. Diese Scheibchen von $^1/_2$ bis 1 cm Durchmesser, wenn man kleinere, 2 bis 4 cm, wenn man grössere Säulen machen will, werden nun in eine wohl isolirende Glasröhre, an welche einerseits bereits eine messingene Kapsel angekittet ist, so ge- 109

schichtet, dass dasselbe Metall stets nach derselben Seite gekehrt ist. Die obere Hülse *h*, Fig 290, wird erst aufgeschraubt, wenn das ganze Röhrchen gefüllt ist. Man muss dafür sorgen, dass die Scheibchen nicht zu lose auf einander liegen, sondern dass sie durch Aufsetzen der zweiten Kapsel möglichst stark zusammengepresst werden. Die beiden Messingkapseln bilden die beiden Pole der Säule.

Zamboni hat sehr wirksame trockene Säulen auch in der Weise construirt, dass er auf der unbelegten Seite eines Bogen von unechtem Silberpapier fein gepulverten Braunstein (Manganhyperoxyd) mittelst eines Korkstopfens einrieb. Aus solchen Blättern wurden dann die Scheiben ausgeschlagen, welche zum Aufbau der Säule dienen sollten. Nach den Erfahrungen des Verfassers nimmt die Wirksamkeit der so hergestellten Säulen bald sehr merklich ab.

Eine trockene Säule von 100 bis 200 Scheibchen bringt bereits ohne Condensator eine wenn auch nicht bedeutende Divergenz am Goldblattelektrometer hervor. Mit wachsender Zahl der Plattenpaare wächst die Divergenz. An den Polen einer trockenen Säule von mehreren tausend Plattenpaaren ist die elektrische Spannung stark genug, um am Strohhalmelektrometer eine mehr oder weniger bedeutende Divergenz hervorzubringen und eine sehr dünnglasige Leydener Flasche oder, noch besser, einen Glimmercondensator stark genug zu laden, um einen merklichen Schlag zu geben. Singer construirte eine trockene Säule von 20000 Paaren, welche eine dünnglasige Flasche von 350 qcm Oberfläche in 10 Minuten so stark lud, dass der Entladungsschlag einen Platindraht von 2,5 cm Länge und 0,05 mm Durchmesser schmolz, oder einen Schlag gab, welcher bis in die Achseln fühlbar war.

Fig. 290.



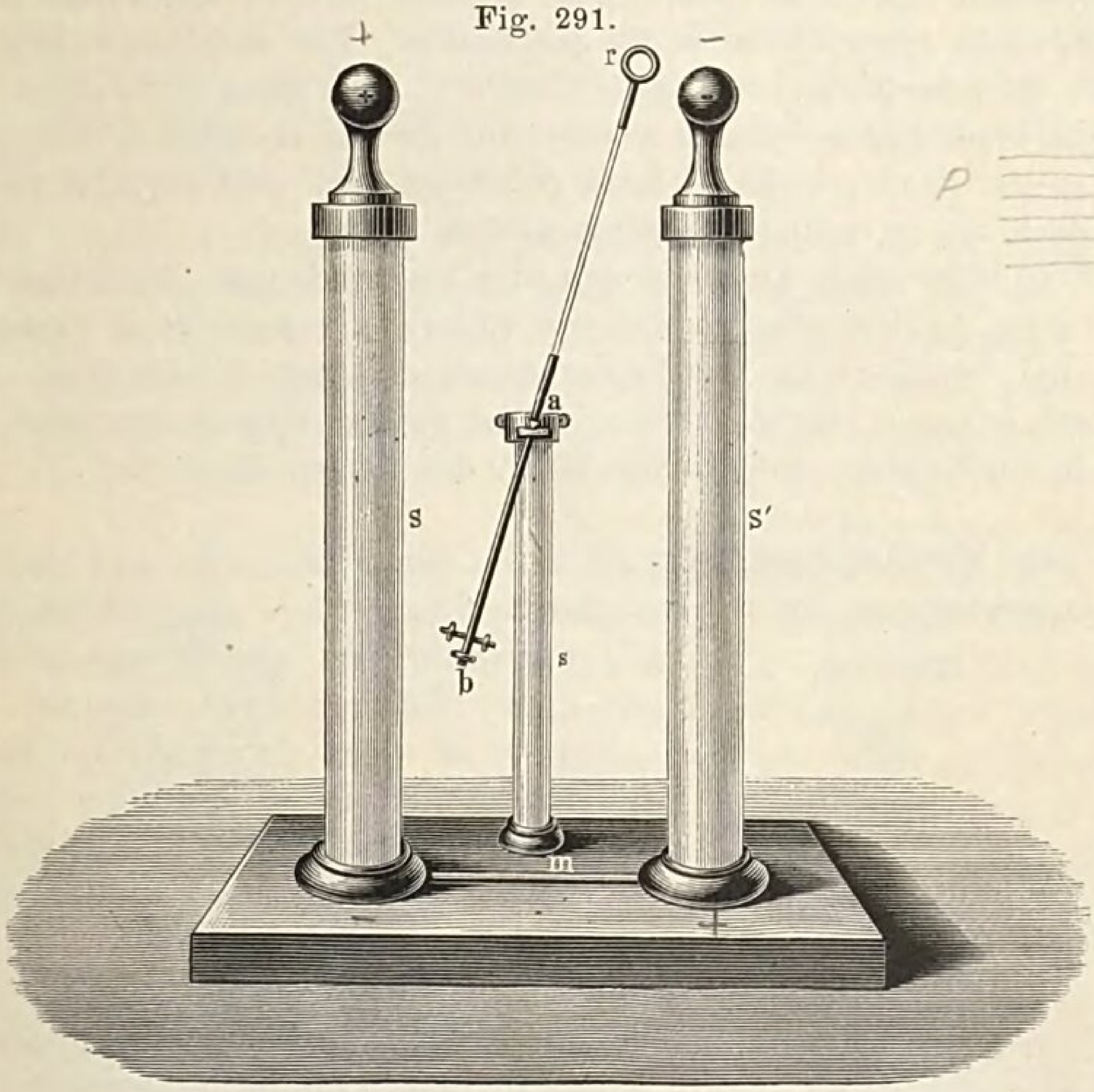
Die kräftigsten trockenen Säulen, selbst eine von 20000 Paaren, bringen noch keine merkliche chemisehe Wirkung hervor, wozu, wie wir bald sehen werden, schon eine Volta'sche Säule von wenigen Plattenpaaren ausreicht. Ueberhaupt giebt die trockene Säule zwar relativ bedeutende Spannungserscheinungen, aber die Stromeffecte fehlen ihr. Dass diese Erscheinungen bei dieser Säule fehlen, hat besonders in der unvollkommenen Leitungsfähigkeit des Papiers seinen Grund. Die elektrischen Flüssigkeiten können nur langsam die Säule bis zu den Polen durchwandern, und in Folge dieser Langsamkeit tritt ein Gleichgewichtszustand ein, den wir sogleich näher untersuchen wollen.

Wenn beide Pole der Säule isolirt sind, so häufen sich die entgegengesetzten Elektricitäten bald in gleichem Maasse an den Polen an: die Spannung wächst hier, bis die Elektricitätsmenge, welche jeder Pol durch die Luft in einem gegebenen Zeittheilchen verliert, gleich derjenigen Menge ist, welche in derselben Zeit dem Pole durch die Säule wieder zugeführt wird. Von diesem Augenblicke an bleibt die Spannung

an den Polen constant. Wird nun die Luft und damit die Glasoberfläche feuchter, so beträgt der elektrische Verlust an den Polen einen grösseren Bruchtheil der gesammten daselbst angehäuften Elektricität, während doch die Menge der dem Pole zugeführten Elektricität dieselbe bleibt; daraus ergiebt sich dann, dass in feuchter Luft die Spannung an den Polen geringer sein muss als in trockener Luft.

Die trockenen Säulen wendet man an, um das sogenannte elektrische Perpetuum mobile, Fig. 291, zu construiren. Zwei Säulen, S und S', jede etwa von 2000 Paaren, werden so neben einander gestellt, dass bei der einen der positive, bei der anderen der negative Pol unten

Fig. 291.



ist; diese beiden unteren Pole werden nun durch einen Metallstreifen m in gut leitende Verbindung gebracht, während das Ganze isolirt bleibt, und dadurch erhält man ein System, welches in der That einer einzigen Säule von 4000 Paaren gleich ist, nur sind die beiden Pole dieser Säule nach oben gekehrt.

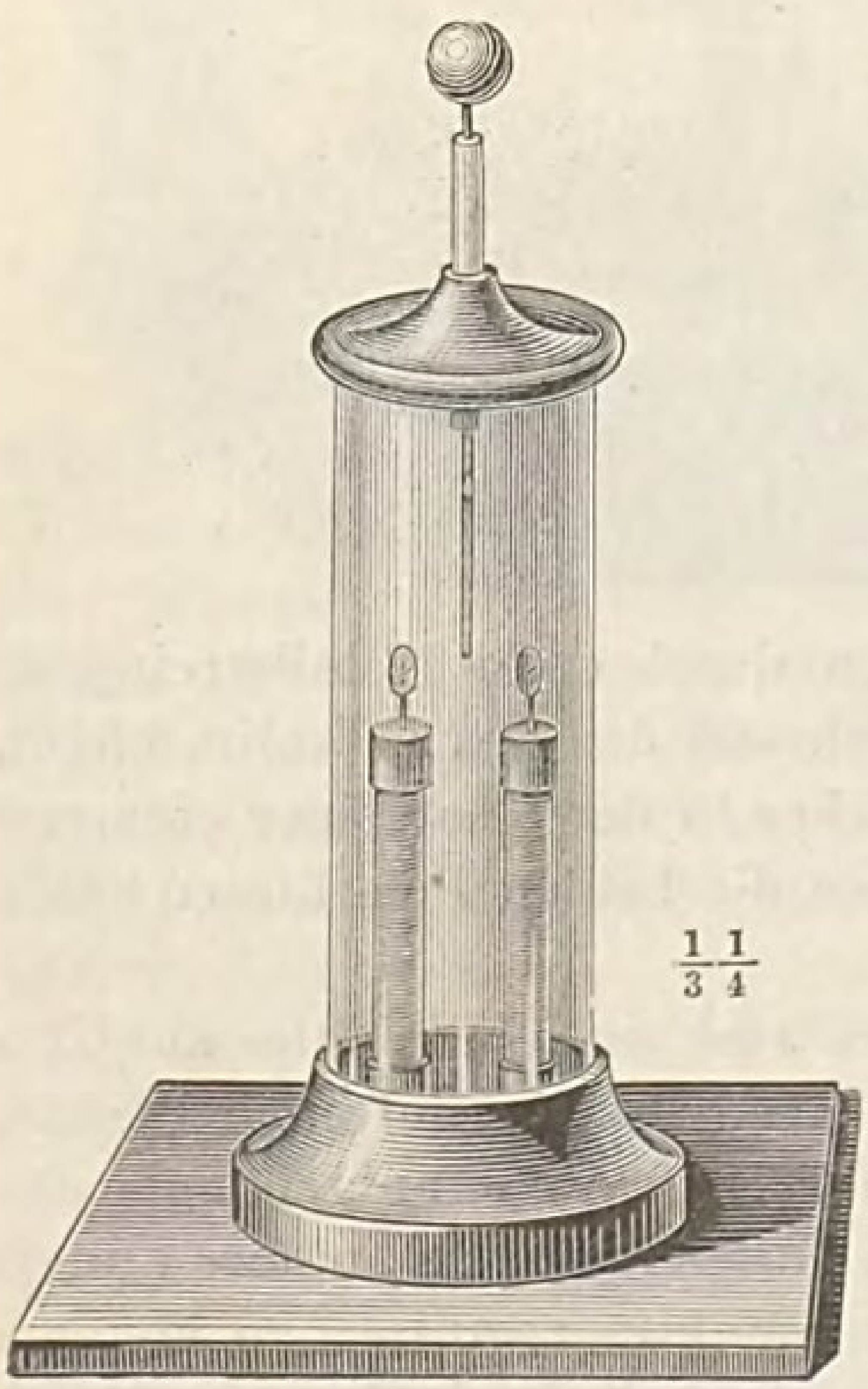
Auf einem dritten isolirenden Säulchen s ist ein sehr leichtes aus Glas und Metall hergestelltes Pendel mittelst einer Schneide auf einer Pfanne, ähnlich wie ein Wagebalken, jedoch in senkrechter Lage, aufgehängt; das obere Ende r desselben trägt ein metallenes Ringelchen, das untere Ende b eine Vorrichtung, um die Lage des Schwerpunktes reguliren zu können. Man giebt dem letzteren eine Lage sehr nahe oberhalb des Aufhängepunktes,

so dass das Pendel eben noch labil aufgehängt ist. In Folge dessen bleibt es nicht in der Mitte stehen, sondern senkt sich langsam gegen eine der beiden Kugeln, welche die Pole der Säule bilden, ladet sich daselbst mit dessen Elektricität, wird abgestossen und nähert sich der anderen Kugel. Dort neutralisirt sich die übergeführte Elektricität und es nimmt das Pendel entgegengesetzte auf. In Folge dessen tritt neuerdings Abstossung ein und so fort. Ein solches Pendel kann sehr lange im Gange bleiben. Im physikalischen Kabinett der Innsbrucker Universität befindet sich ein solches seit dem Jahre 1823 in Bewegung. Die Oscillationsdauer wechselt innerhalb gewisser Grenzen mit dem Feuchtigkeitszustande der Atmosphäre und deshalb ist das elektrische Pendel zum Betriebe einer Uhr nicht zu gebrauchen. Ein wirkliches Perpetuum mobile ist jedoch das elektrische Pendel nicht, denn die aufgewendete Energie kann nur gewonnen werden auf Kosten chemischer Energie im Inneren der Säule, welche hierdurch, wenn auch erst nach langer Zeit, aber doch sicher endlich erschöpft werden muss.

Eine Mittelstufe zwischen den hier beschriebenen „trockenen“ und den nassen Säulen nehmen die von v. Beetz construirten Gypssäulen ein. Bei derselben ist das Papier durch eine mit Salzlösungen angerührte Gypsmasse ersetzt, welche in Glascylinder eingegossen wird, während je ein Kupfer- und Zinkdraht an den Enden hineinragt.

110 **Das Säulenelektrometer.** Zu den wichtigsten und sinnreichsten Anwendungen, die man von der trockenen Säule gemacht hat, gehört unstreitig das von Behrens erfundene Säulenelektrometer, welches in vielen Fällen, wo es sich um Nachweisung geringer elektrischer Spannungen handelt, wie z. B. beim Volta'schen Fundamentalversuche, ausgezeichnete Dienste leistet. Fig. 292 stellt das Säulenelektrometer in seiner von Bennet herrührenden Form dar. Innerhalb eines 2 bis 5 cm weiten Glasrohres befinden sich zwei kleine trockene Säulen; sie sind auf dem hölzernen Fusse befestigt, in welchen der Glascylinder eingelassen ist, und ihre unteren Enden sind durch einen Metalldraht in leitende Verbindung gebracht. Die oberen Enden der beiden Säulen, von welchen das eine ein positiver, das andere ein negativer Pol ist, sind mit kleinen Polplatten versehen. Durch den

Fig. 292.



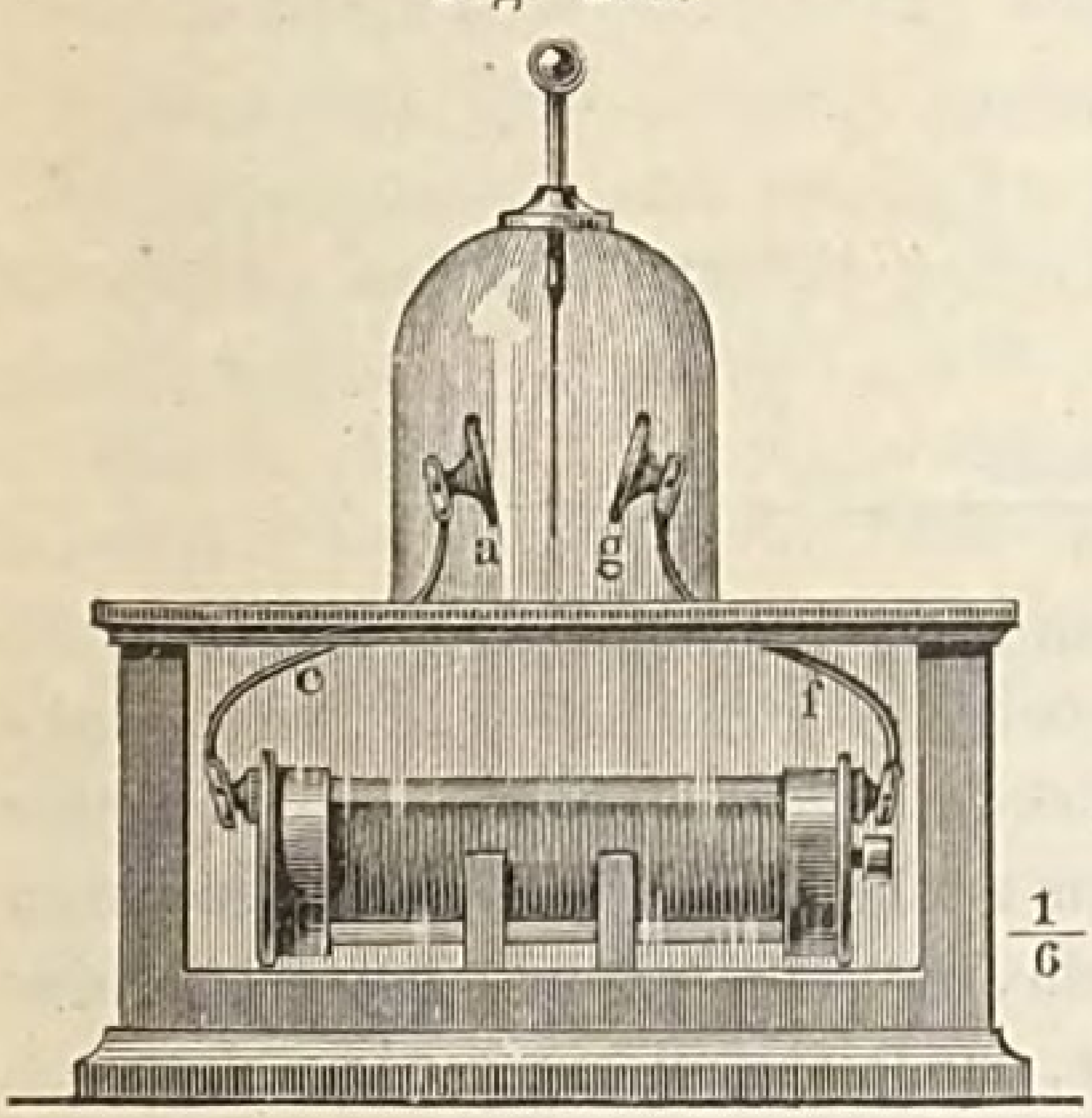
$\frac{1}{3}\frac{1}{4}$

Deckel des Glascylinders geht, gehörig isolirt, ein Metalldraht herab, auf welchen oben eine Metallkugel oder eine Condensatorplatte aufgeschraubt werden kann und an dessen unterem Ende ein einfacher Streifen von Blattgold aufgeklebt ist; das untere Ende desselben hängt gerade in der Mitte zwischen den Polplatten der beiden Säulen. Es ist nun klar, dass das Goldblättchen, wenn ihm auch nur die geringste elektrische Ladung mitgetheilt wird, nach der einen oder der anderen Seite ausschlagen muss, je nachdem die Ladung eine positive oder eine negative ist.

Bohnenberger änderte diesen Apparat in der Weise ab, dass er den Deckel des Glascylinders von Metall machte und an diesen die beiden Säulen anschraubte, so dass sie von oben in das Glasgefäss hinabragen und das untere Ende des Goldblättchens in der Mitte zwischen den unteren Polen der beiden Säulen hängt.

Statt zweier verticaler Säulen wandte Becquerel zuerst eine horizontale mit verticalen Polplatten an, zwischen welchen das Goldblättchen herabhängt. Fechner hat diesen Apparat noch sehr verbessert und ihm die in Fig. 293 dargestellte Einrichtung gegeben, durch welche er höchst empfindlich und ein für die leichte und sichere Anstellung der Volta'schen Fundamentalversuche sehr werthvolles Instrument wurde.

Fig. 293.



In dem Kasten, Fig. 293, befindet sich in horizontaler Lage eine trockene Säule von 800 bis 1000 ungefähr thalergrossen Plattenpaaren, welche in einer Glasröhre luftdicht eingeschlossen sind, die an ihren Enden mit metallenen Kappen verschlossen ist. Diese Kappen stehen mit den Polen der Säule in leitender Verbindung und von ihnen gehen die Metalldrähte *c* und *f* aus, welche, durch einen Spalt im Deckel des Kastens hindurchgehend, mit den Polplatten *a* und *g* endigen. Ueber diese ist nun eine Glasglocke gestülpt, in welcher das von einem isolirten Metalldrahte getragene Goldblättchen herabhängt. Um die Ladung der beiden Platten *a* und *g* vor dem Versuche ganz gleich zu machen, hat Riess noch eine Vorrichtung hinzugefügt, welche gestattet, die beiden Pole vorübergehend metallisch zu verbinden. Näheres über diesen Gegenstand sehe man bei Riess, Reibungselektricität §. 14 bis 18.

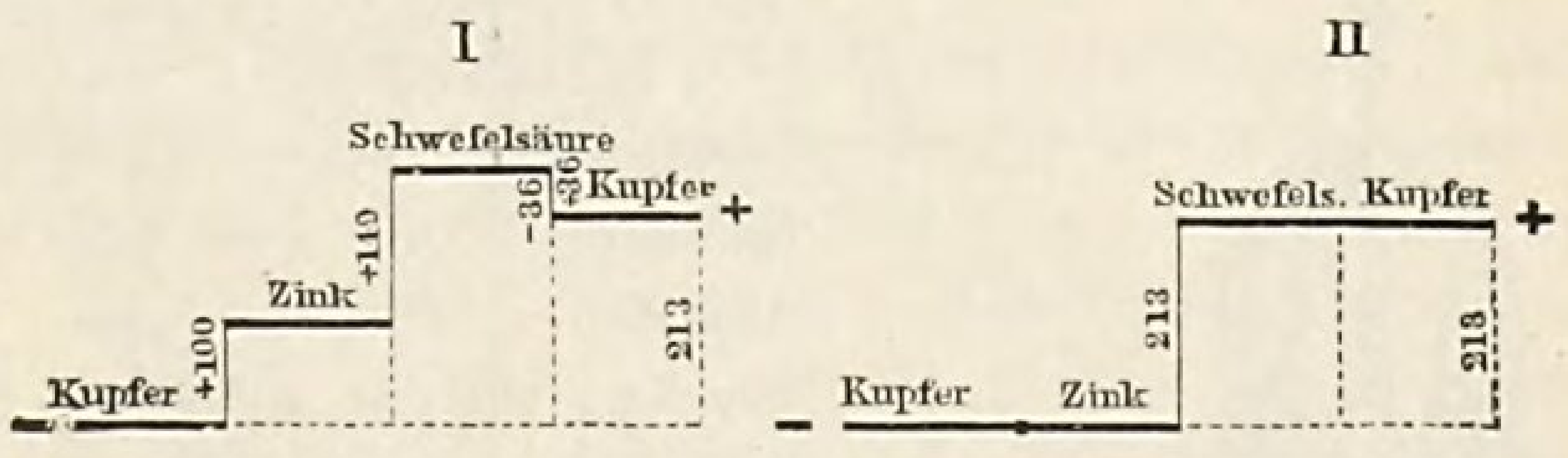
Die Anwendung der trockenen Säule zur constanten Ladung des Thomson'schen Quadrantenelektrometers haben wir schon Seite 224 besprochen. Wir haben dort auch erwähnt, dass man neuerer Zeit die

trockenen Säulen durch vielelementige nasse Säulen ersetzt, welche constantere Ladungen geben als jene.

111 **Entstehung des elektrischen Stromes.** An mehreren Stellen haben wir ausführlich erörtert, warum durch Combination von Leitern erster Ordnung keine dauernde elektrische Strömung erhalten werden kann. Es fehlt in solchen Systemen von Leitern an einer Energiequelle, welche den Strom liefern könnte. Würde man an irgend einer Berührungsstelle eine solche Energiequelle anbringen, so würde auch der Entstehung eines Stromes kein principielles Hinderniss entgegenstehen. Es giebt zwei solche Energiequellen. Die eine ist die Wärme, die andere die Affinität. Auf der ersteren beruht der Thermostrom, auf der letzteren der galvanische Strom, den man richtiger den Volta'schen Strom nennen sollte. Mit den Thermoströmen werden wir uns später beschäftigen. Die Erklärung der Entstehung des galvanischen Stromes wird verschieden ausfallen, je nach dem Standpunkte, den man dem Volta'schen Fundamentalversuch gegenüber einnimmt.

Volta selbst wusste noch nichts von dem Princip der Erhaltung der Energie; er hatte erkannt, dass durch Leiter, welche dem Gesetze

Fig. 294.



der Spannungsreihe folgen, keine Stromkette zu erhalten ist und er suchte deshalb nach anderen Leitern, welche zwar die Elektricität abführen, aber nicht elektromotorisch wirken. Er glaubte solche Leiter in den leitenden Flüssigkeiten gefunden zu haben. Dieselben sind nun zwar ebenfalls elektromotorisch wirksam, da sie aber dem Gesetze der Spannungsreihe nicht unterworfen sind, so leisteten sie Volta dennoch den Dienst, welchen er von ihnen erwartet hatte. Um also von diesem Standpunkte aus die Stromwirkung eines Volta'schen Elementes zu erklären, genügt es, auf das schon im §. 108 mitgetheilte Potentialschema zu verweisen, welches wir hier mit der Beschränkung auf Ein Element nochmals abbilden, Fig. 294 I. Das Kupfer am + Pole steht auf einem um 213 Einheiten*) höheren Potential als das Kupfer am — Pol; setzt man daher die beiden Pole in Verbindung, so muss ein Strom entstehen, durch welchen dann freilich, wie wir später zeigen werden, die Potentialhöhen auf den Leitern modificirt werden.

*) Kupfer | Zink = 100 gesetzt.

Man kann sich die Sache auch so vorstellen: Während zwischen den Metallen nur die Contactwirkung stattfindet, treten an der Berührung von Metall und Flüssigkeit ausser der Contactwirkung auch noch chemische Wirkungen auf. Die Contactwirkungen compensiren sich unter einander und tragen daher zur Strombildung Nichts bei, welche letztere daher ausschliesslich eine chemische Wirkung ist. Wir können daher die Contactwirkungen als gar nicht vorhanden ansehen und brauchen, um die Potentialdifferenz an den Polen zu construiren, in dem Schema der Kette nur da eine Potentialstufe einzuschalten, wo ein chemischer Angriff stattfindet. Das Schema des Volta'schen Elementes wird dann, wie in Fig. 294 II, vereinfacht (dabei ist angenommen, dass zwischen Kupfer und Schwefelsäure keine chemische Wirkung stattfinde)*).

Wenn man die Contactelektricität durch die chemische Einwirkung von Luft (Sauerstoff) oder Feuchtigkeit auf die Metalle erklärt, so darf man für die in verdünnte Schwefelsäure getauchten Metalle diese chemischen Wirkungen nicht nochmals in Anrechnung bringen, es tritt vielmehr an deren Stelle die chemische Wirkung der verdünnten Schwefelsäure auf das Zink und das Kupfer.

Mag man also der Contacttheorie oder der chemischen Theorie des Fundamentalversuches anhängen, für die Erklärung der Entstehung des Stromes kommt immer nur die chemische Action in Betracht.

Man hat sich darüber gestritten, ob die chemische Action dem Strome vorangeht, oder der Strom die chemische Action einleitet. Gegen die erstere Annahme wurde geltend gemacht, dass es Combinationen von Metallen mit Flüssigkeiten giebt, welche vor Schluss der Kette gar keine chemische Action zeigen, während diese sofort beginnt, sobald man durch die Verbindung der Pole den Strom in Gang setzt. Schönbein schlug daher die vermittelnde Annahme vor, dass der Strombildung ein durch den Contact hervorgerufener Spannungszustand (eine „Tendenz zur chemischen Verbindung“) vorausgehe, welcher im Moment des Kettenschlusses den Strom einleite, dass aber der eingeleitete Strom ausschliesslich durch die chemische Action im Fortgange erhalten werde**).

Nach unserer Ansicht ist der ganze Streit ein müssiger. Man hat es mit einer Umwandlung von potentieller Energie in kinetische Energie und weiterhin in Wärme zu thun. Fassen wir nun einen analogen Umwandlungsprocess auf mechanischem Gebiete ins Auge. Ein Stein

*) Während des Druckes kommen uns die Messungen von James Moser (Wiedem. Beibl. XI, S. 788) zur Kenntniss, bei welchen mittelst Tropfencollectors die Potentialdifferenzen zwischen den Bestandtheilen mehrerer Elemente gemessen wurden, aus welchen der Verfasser auf die Abwesenheit einer Potentialdifferenz zwischen den Metallen schliessen zu dürfen glaubt. Man vergleiche auch die von W. Ostwald (Zeitschr. f. phys. Chemie I, S. 583) erhaltenen Resultate.

**) Näheres hierüber: Wiedemann's Lehre v. d. Elektricität, S. 981.

gleite über eine schiefe Ebene hinab und entwickle dabei durch Reibung Wärme. Potentielle Energie (die in der gehobenen Last aufgespeicherte Arbeit) wird verbraucht, dafür wird kinetische Energie (lebendige Kraft) gewonnnen, welche dann weiterhin in Wärme verwandelt wird. Hier fällt es uns nicht ein zu fragen, was vorausgehe, der Verbrauch der potentiellen Energie oder die Entstehung der kinetischen Energie. Beide Vorgänge sind unzertrennlich verbunden und deshalb ganz gleichzeitig. Ebenso sind in der Volta'schen Kette der Verbrauch der chemischen Spannkraft einerseits und der Gewinn an Energie des Stromes unzertrennlich verknüpfte, durchaus gleichzeitige Vorgänge. Eine andere Frage ist die nach dem Grunde, welcher diese Umwandlung veranlasst und welcher bestimmt, dass sie gerade in dieser Richtung und nicht umgekehrt verläuft. Darauf können wir hier nur vorläufig die Antwort geben, dass es der erweiterte Carnot'sche Satz (zweite Hauptsatz der Wärmetheorie, Gesetz der Vermehrung der Entropie) ist, welcher hier gerade so mit ins Spiel tritt, wie beim fallenden Steine. Auch der Stein fällt ohne fremde Hülfe und verwandelt seine potentielle Energie in kinetische Energie und in Wärme, dagegen gelingt es nicht ohne Compensation durch eine entgegengesetzte Verwandlung, diese Wärme wieder zurück in potentielle Energie zu verwandeln.

Das, was Schönbein die „Tendenz der chemischen Action" nennt und was jetzt von den Physikern als Anziehung von Seite der eingetauchten Metalle (Elektroden) auf die Bestandtheile (Jonen) der leitenden Flüssigkeit (des Elektrolyts) gedeutet wird, welche Anziehung für die Richtung des nachherigen Stromes entscheiden soll*), das wäre in unserer Analogie der Druck des Steines nach abwärts. Um den Fall des Steines herbeizuführen, bedarf es nur noch ihn loszulassen, diese geschieht bei der Volta'schen Kette durch die Berührung der Poldrähte.

112 **Verschiedene Formen der Volta'schen Kette.** Die §. 108 besprochene Volta'sche Säule war der erste hydroelektrische Rheomotor (Stromerreger); allein diese Form bietet mannigfache Missstände. Die unteren Scheiben nämlich sind durch das Gewicht der oberen stärker zusammengedrückt; die feuchten Scheiben werden dadurch ausgepresst, sie werden trocken, während die Flüssigkeit an der Seite der Säule herunterrinnt; dadurch wird aber eine leitende Verbindung zwischen den einzelnen Plattenpaaren hervorgebracht, welche den Totaleffect schwächt.

Diesen Uebelstand suchte Cruikshank durch den Trogapparat, Fig. 295 und Fig. 296, zu vermeiden. Die einzelnen Elemente dessel-

*) Wiedemann's Lehre v. d. Elektricität, II, S. 998, §. 1119.

ben bestehen aus rechtwinkeligen Platten von Kupfer und Zink, welche aufeinander gelöthet sind. Diese Plattenpaare sind einander parallel in

Fig. 295.

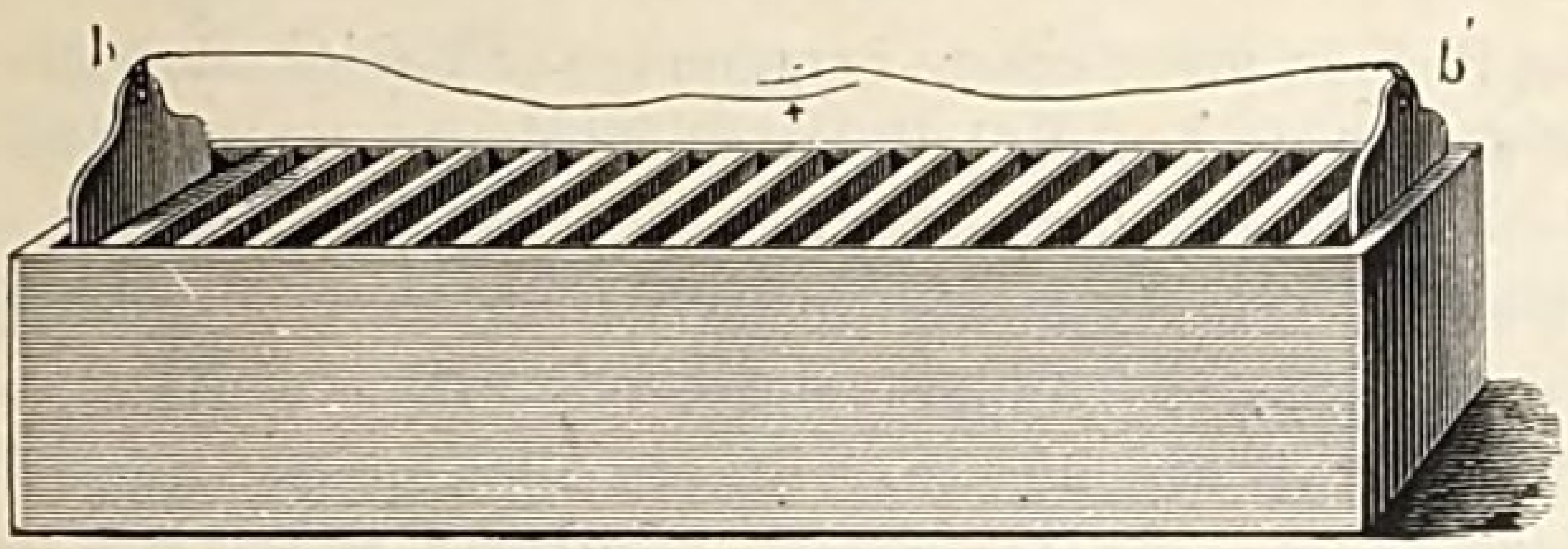
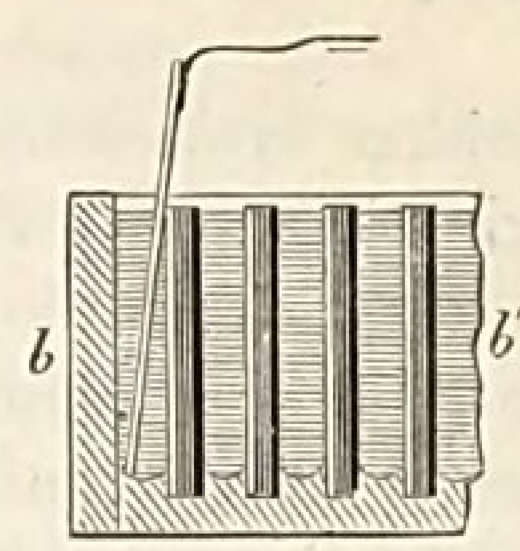


Fig. 296.



einem Kasten von Holz, dessen Wände inwendig mit einer nicht leitenden Harzschicht überzogen sind, so befestigt, dass der Zwischenraum zwischen je zwei Plattenpaaren eine Zelle, einen Trog bildet, der mit gesäuertem

Fig. 297.

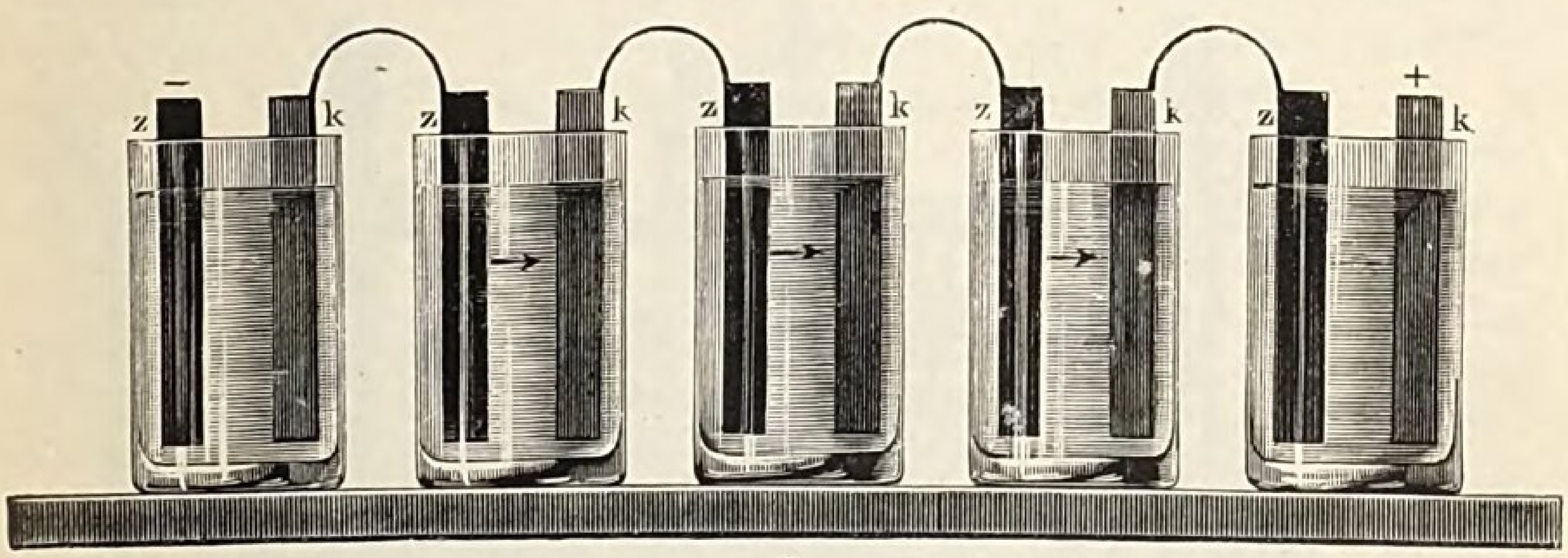
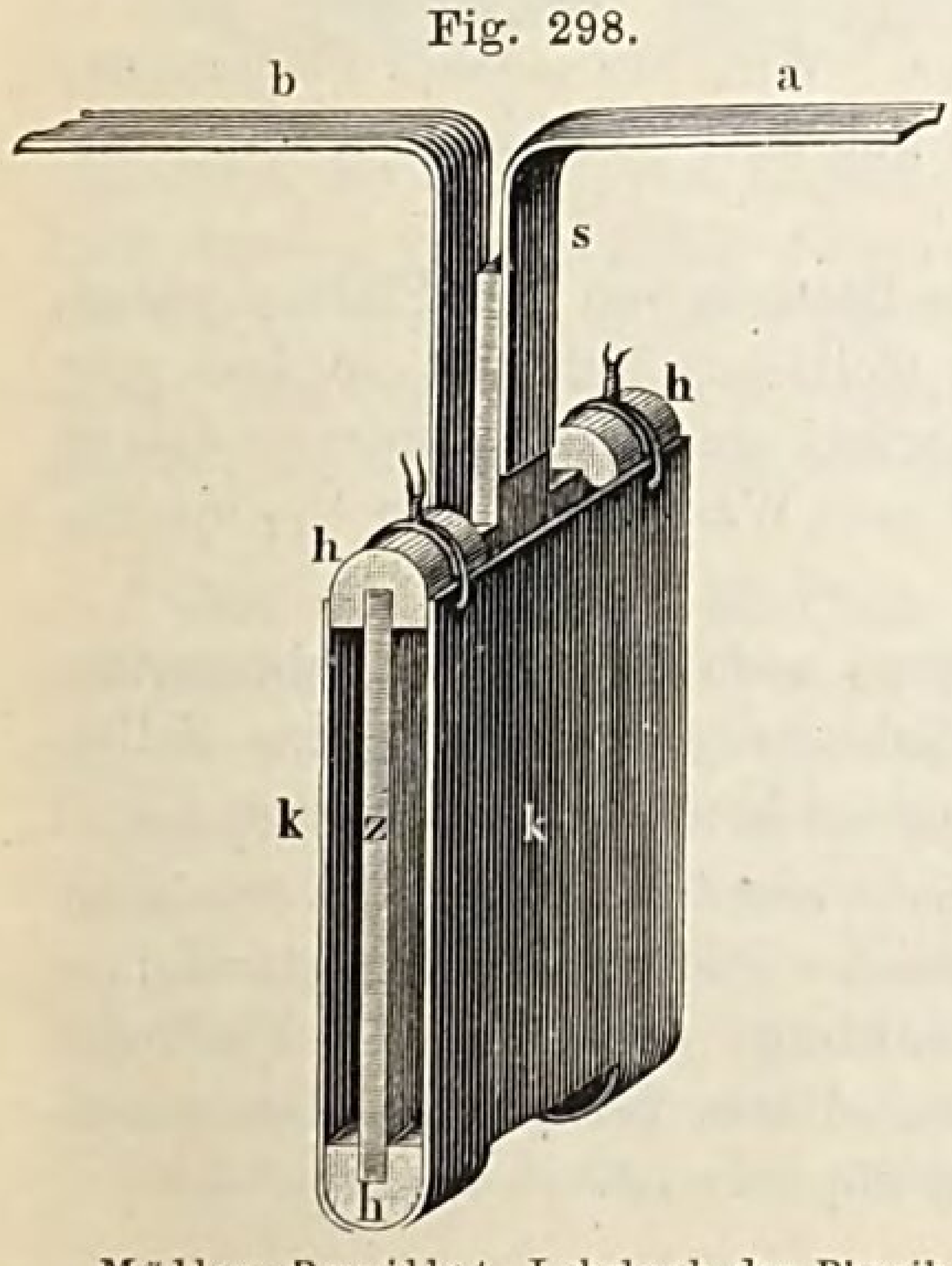


Fig. 298.



Wasser gefüllt wird. Diese Wasserschicht, welche ungefähr 6 mm dick ist, vertritt hier die Stelle der feuchten Scheibe.

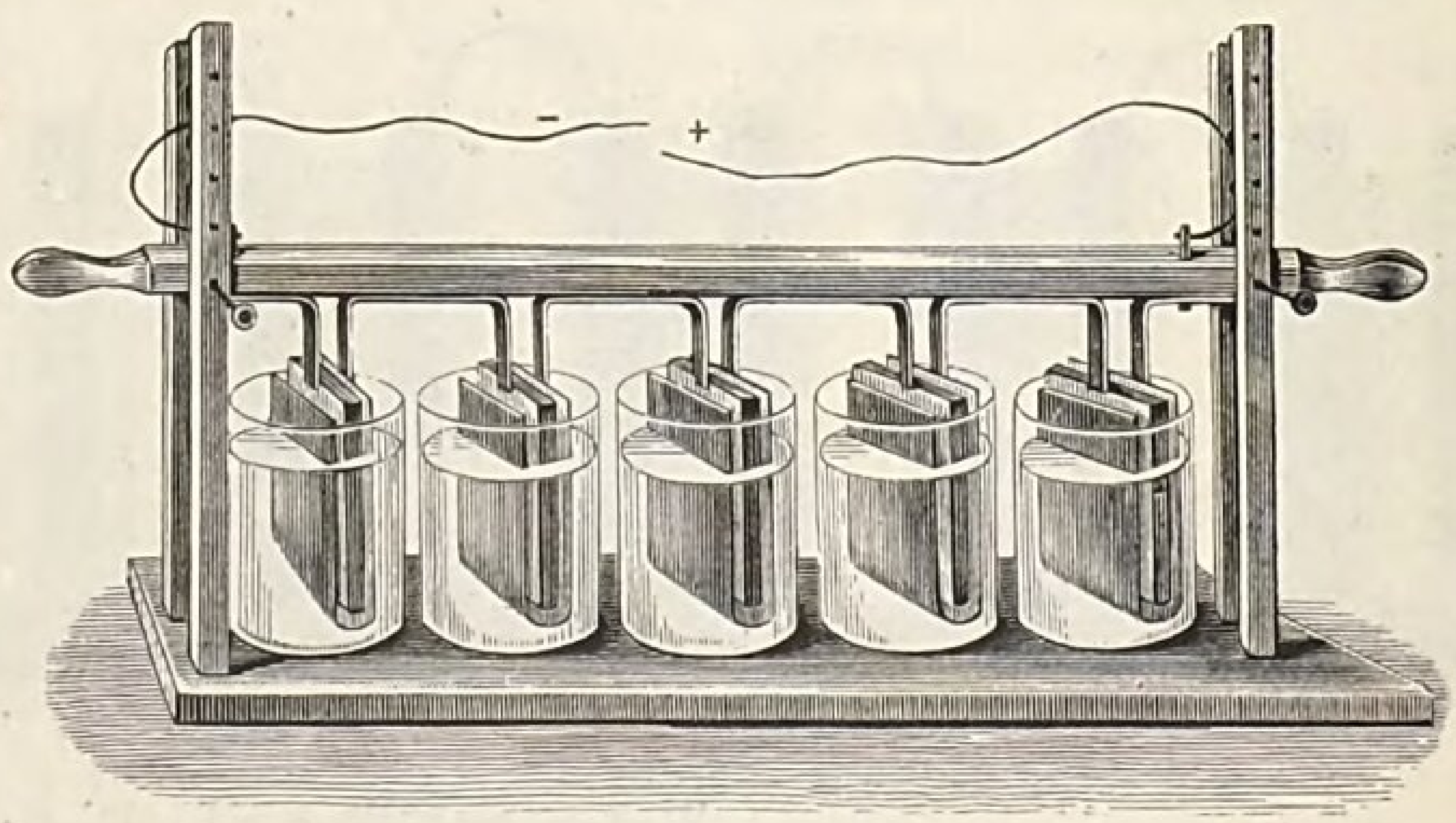
Bei Volta's Becherapparat, von ihm Corona di tazza genannt, befindet sich die Flüssigkeit in getrennten Gefässen oder Gläsern, die zu einem Kreise oder in gerader Linie zusammengestellt sind. Jedes Glas enthält eine Zink- und eine Kupferplatte, die sich aber nicht berühren; jede Zinkplatte ist durch einen Kupferdraht oder Kupferstreifen mit der Kupferplatte des vorhergehenden Glases verbunden, wie dies durch das Schema Fig. 297 angedeutet ist, wo die Kupferplat-

ten mit k, die Zinkplatten mit z bezeichnet sind. In jedem einzelnen Becher geht der positive Strom von der Zinkplatte durch die Flüssigkeit zur gegenüber stehenden Kupferplatte.

Jeder einzelne Becher mit seiner erregenden Flüssigkeit und den beiden in dieselbe eingetauchten Metallplatten wird ein galvanisches (richtiger Volta'sches) Element genannt.

Man hat die Form dieser Apparate durch Veränderung der Plattenform auf das Mannigfaltigste abgeändert: so ist z. B. in der Wollaston'schen Kette, von welcher in Fig. 298 (a. v. S.) ein Plattenpaar abgebildet ist, die Kupferplatte so um die Zinkplatte herumgebogen, dass jeder Seite der Zinkplatte eine Kupferfläche gegenübersteht. Die Zinkplatte z ist durch Holzstückchen vor leitender Berührung mit der Kupferplatte k geschützt. Von der Kupferplatte k führt ein Kupferstreifen b zur Zink-

Fig. 299.



platte des vorhergehenden Plattenpaares. Wird ein solches Plattenpaar in die Säure eingetaucht für sich allein gebraucht, so bilden a und b die beiden Pole.

Fig. 299 zeigt die Wollaston'sche Batterie von fünf Plattenpaaren. Sämmtliche Plattenpaare sind an einer Holzleiste befestigt, so dass man sie gleichzeitig in die Flüssigkeit eintauchen und wieder herausnehmen kann. Zur Füllung der Gefässe wendet man Wasser an, dem $^1/_{12}$ bis $^1/_{20}$ Schwefelsäure zugesetzt ist.

Statt der einzelnen Gläser wendet man auch Tröge von gebranntem und glasirtem Thon an, welche durch Scheidewände in einzelne Zellen getheilt sind, so dass immer ein Plattenpaar in eine Zelle kommt.

Diese Absonderung ist übrigens nicht absolut nöthig, die Säule ist auch noch wirksam, wenn man sämmtliche Plattenpaare in ein Gefäss ohne alle Abtheilungen eintaucht. Allerdings geht hier ein Theil des Effects durch Nebenschliessung verloren, dieser Verlust ist aber um so geringer, je kleiner die Anzahl der Plattenpaare ist.

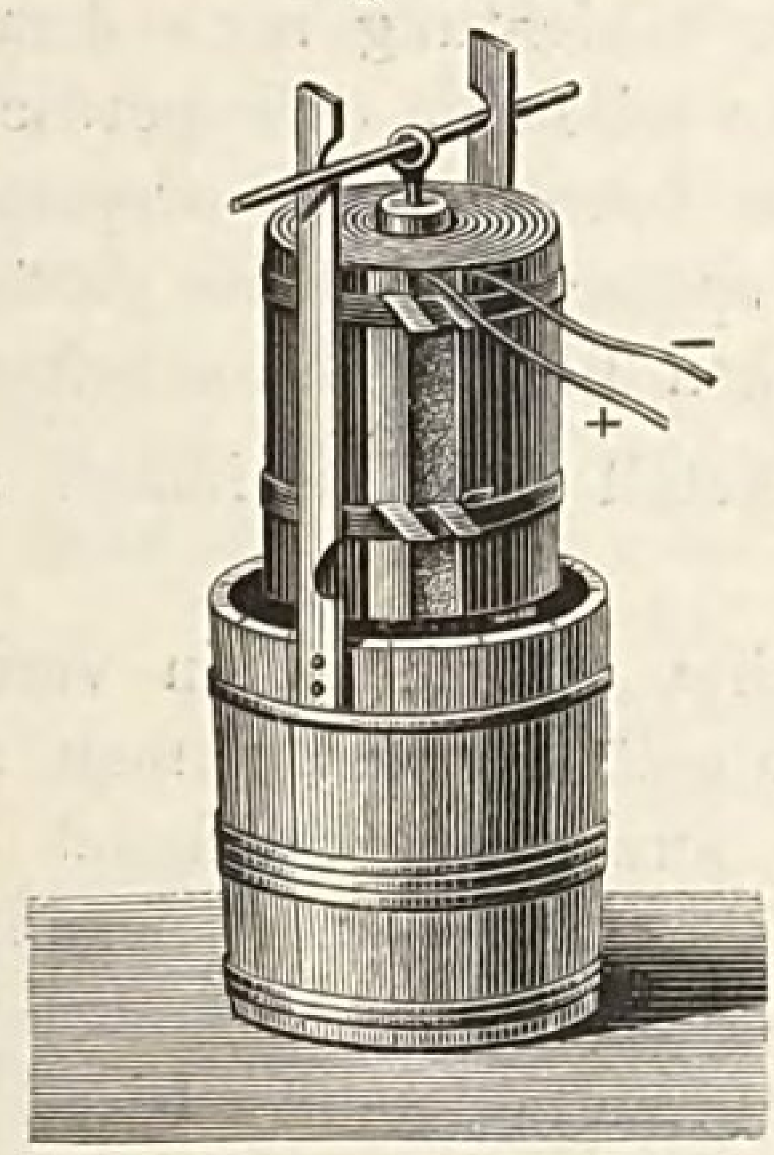
Ganz in ähnlicher Weise, wie die Wollaston'sche Batterie, ist auch die Smee'sche aus Zink und platinirtem Silber construirt; nur ist die Silberplatte auf beiden Seiten vom Zink umgeben, wie es auch bei der Platinplatte der Grove'schen Batterie der Fall ist, die wir bald werden kennen lernen.

Wo man getrennte Gläser anwendet, um die einzelnen Plattenpaare hineinzutauchen, da ist es der Raumersparniss wegen vortheilhaft, den Metallplatten die Form eines hohlen Cylinders zu geben, wie Fig. 300 zeigt, wo *k* den Kupfercylinder, *z* einen engeren concentrisch hineingestellten Zinkcylinder darstellt, wie sie in ein und dasselbe Glasgefäss eingestellt werden. Es versteht sich von selbst, dass der Zinkcylinder mit dem Kupfercylinder desselben Gefässes nicht in metallischer Berührung steht. Jeder Kupfercylinder ist durch einen Kupferdraht oder einen Streifen von Kupferblech mit dem Zinkcylinder des folgenden Paares verbunden. — Dies ist die Grundform der meisten neueren Rheomotoren.

Fig. 300.



Fig. 301.



Wenn es auf eine sehr grosse Oberfläche der Metallplatten ankam, wandte man früher Hare's Calorimotor an, welcher in Fig. 301 dargestellt ist. Auf einem Holzcylinder, welcher etwa 8 cm im Durchmesser hat und 0,3 bis 0,5 m hoch ist, sind zwei Platten, die eine von Zink, die andere von Kupfer, gleichsam aufgewickelt, welche durch Tuchstreifen von einander getrennt sind. Man erhält auf diese Weise ein Plattenpaar von 5 bis 6 qm Oberfläche. Der Name Calorimotor rührt daher, weil dieser Apparat besonders geeignet ist, kurze Metalldrähte glühend zu machen und zu schmelzen.

Die constanten Ketten im Allgemeinen. Die bisher be- 113
schriebenen Formen der Volta'schen Kette haben das Missliche, dass sie nur einige Zeit nach dem Eintauchen der Metalle in die sauren Flüssigkeiten kräftig wirken, dann aber rasch an Wirksamkeit abnehmen und bald fast gänzlich aufhören, einen Strom zu liefern.

Nimmt man eine solche Kette auseinander, so findet man, dass die Schwefelsäure ganz oder zum Theil durch Verbindung mit Zinkoxyd in Zinkvitriollösung verwandelt ist, ferner, dass die Kupferplatte sich mit Wasserstoffgas beladen oder mit einem Ueberzug von metallischem Zink

bedeckt hat. Wir nennen jene Veränderung, welche die Metalloberflächen durch den Strom erleiden und welche den letzteren schwächen und endlich aufheben, die galvanische Polarisation. Eine Erklärung dieser Veränderung, sowie der chemischen Vorgänge hierbei und eine darauf gestützte Theorie der constanten Ketten können wir erst an späterer Stelle vortragen, wenn wir vorher die Gesetze der Elektrolyse kennen gelernt haben. Da wir aber diese constanten Ketten von jetzt an oft anwenden wollen, so müssen wir schon jetzt eine Beschreibung derselben vorausschicken.

Man versteht unter constanten Ketten solche, welche die oben erwähnten Uebelstände gar nicht oder nur in geringem Grade zeigen und wenigstens einige Stunden lang einen annähernd constanten Strom zu liefern vermögen. Sie gründen sich fast sämmtlich darauf, dass die beiden Metalle nicht in dieselbe Flüssigkeit, sondern in zwei verschiedene Flüssigkeiten getaucht sind, welche selbst durch eine poröse Scheidewand oder mittelst Schichtung nach dem specifischen Gewichte verhindert werden, sich zu mischen. Als poröse Scheidewand, welche den Strom hindurchlassen muss, wurde ursprünglich eine thierische Blase angewendet, welche später durch hohle poröse Thoncylinder ersetzt wurde, die unter dem Namen Thonzellen bekannt sind.

Als elektropositives Metall wird fast immer amalgamirtes Zink angewendet.

Gewöhnliches käufliches Zink wird in verdünnter Schwefelsäure heftig angegriffen und aufgelöst. Wenn man also solches Zink zur Construction einer Säule anwendet, so findet eine lebhafte Gasentwickelung in allen Zellen statt, ehe man noch die Kette geschlossen hat; es wird also schon Wasser zersetzt und Zink aufgelöst, ohne dass ein Strom durch den Apparat hindurchgeht. Diese von der Strombildung völlig unabhängige Wasserzersetzung und Zinkconsumtion wird mit dem Namen der localen Wirkung bezeichnet. Wird eine solche Säule geschlossen, so kommt zu der localen Wirkung noch jene chemische Wirkung hinzu, welche zur Strombildung erforderlich ist.

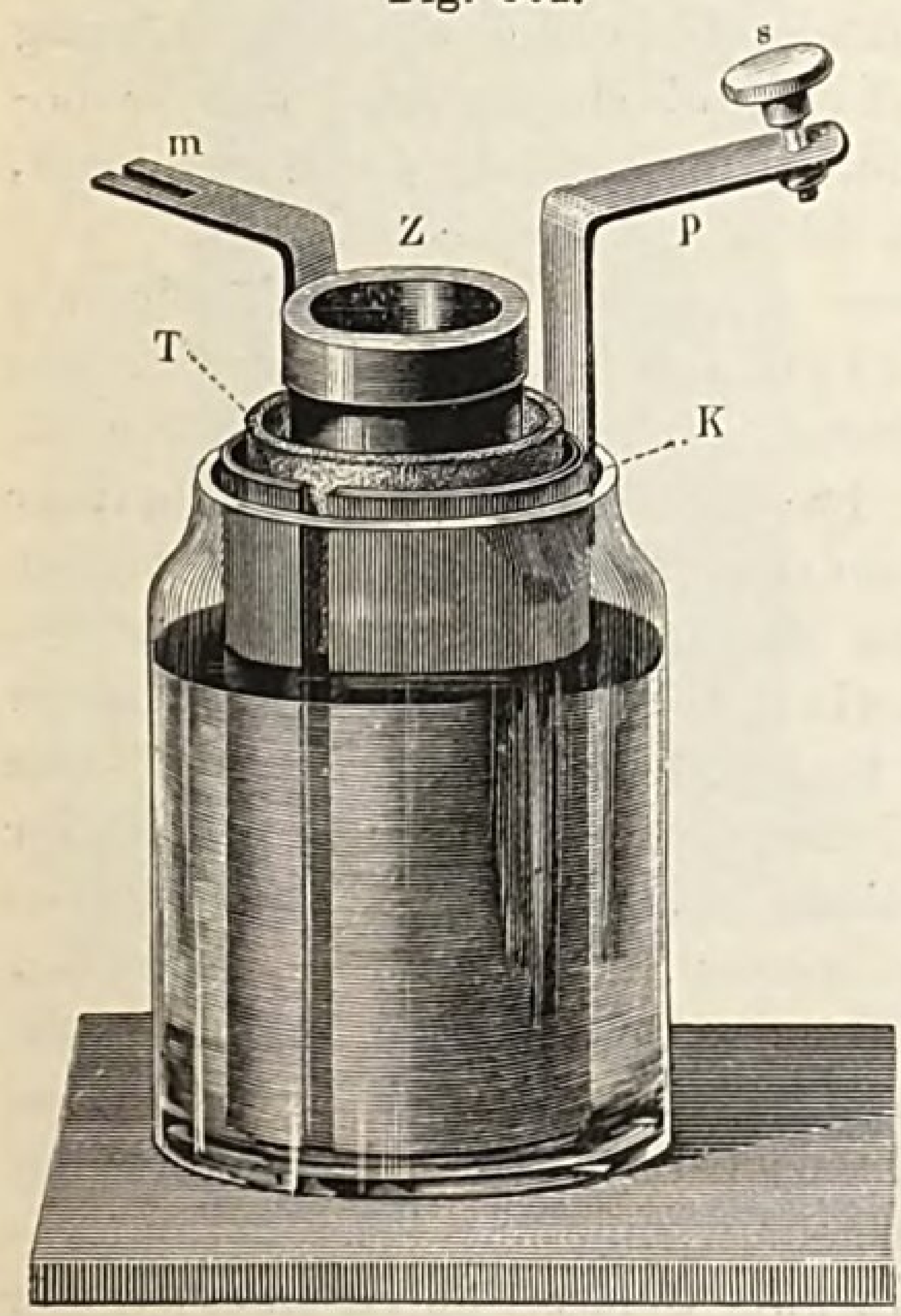
Diese locale Wirkung wird nun dadurch bedeutend vermindert oder selbst ganz aufgehoben, dass man die Zinkplatten amalgamirt, d. h., dass man sie mit einer Schicht von Quecksilber überzieht, was dadurch bewerkstelligt wird, dass man die Oberfläche der Platte durch Eintauchen in verdünnte Schwefelsäure von ihrer Oxydschicht befreit und sie dann rasch in Quecksilber eintaucht oder eine entsprechende Quantität Quecksilber mit einem Lappen auf derselben einreibt, wodurch die Zinkplatte ein silberglänzendes Ansehen erhält. Eine gute Amalgamation der Zinkplatten ist für alle constanten Batterien unerlässlich, wenn nicht eine enorme Zinkconsumtion stattfinden und in Folge der bedeutenden Bildung des schlecht leitenden Zinkvitriols eine rasche Abnahme der Stromstärke erfolgen soll.

Um das Gesagte durch einen Vorlesungsversuch zu illustriren, taucht man in ein mit verdünnter Schwefelsäure gefülltes Glasgefäss einmal einen Streifen nicht amalgamirten käuflichen Zinks, dann einen solchen amalgamirten. Bei jenem tritt starke Gasentwickelung ein, bei diesem ist sie wenig merklich. Verbindet man den Zinkstreifen ausserhalb der Flüssigkeit mit einem mit eingetauchten Kupferstreifen, so wird bei Anwendung käuflichen Zinks an beiden Platten Wasserstoff entwickelt, bei amalgamirtem Zink jedoch nur an der Kupferplatte, was eben unter diesen Umständen die unvermeidliche Wirkung des Stromes ist. Bei den nun zu beschreibenden constanten Ketten wird die Wasserstoffentwickelung auf verschiedene Weise vermieden.

Die Daniell'sche Kette. Die älteste constante Kette ist die **114**
Daniell'sche Kette. Das amalgamirte Zink taucht in verdünnte Schwefelsäure oder in Zinkvitriollösung, als negatives Metall dient Kupfer, welches in eine concentirte Lösung von Kupfervitriol taucht. Die beiden Flüssigkeiten sind durch eine Thonzelle getrennt.

Fig. 302 stellt einen Daniell'schen Becher dar. Das mit einer Lösung von Kupfervitriol gefüllte Glasgefäss enthält zunächst einen aus Kupferblech gebogenen hohlen Cylinder *K*, innerhalb dessen die mit verdünnter Schwefelsäure gefüllte Thonzelle *T* steht. In die Flüssigkeit der Thonzelle ist dann der Zinkcylinder *Z* eingetaucht.

Fig. 302.



An dem Zinkcylinder ist ein geschlitzter Metallstreifen *m*, am Kupfercylinder ein Streifen *p* von Kupferblech befestigt, welcher die Schraube *s* trägt, vermittelst deren man den Kupferstreifen *p* mit dem Streifen *m* des nächsten Bechers zusammenschrauben kann.

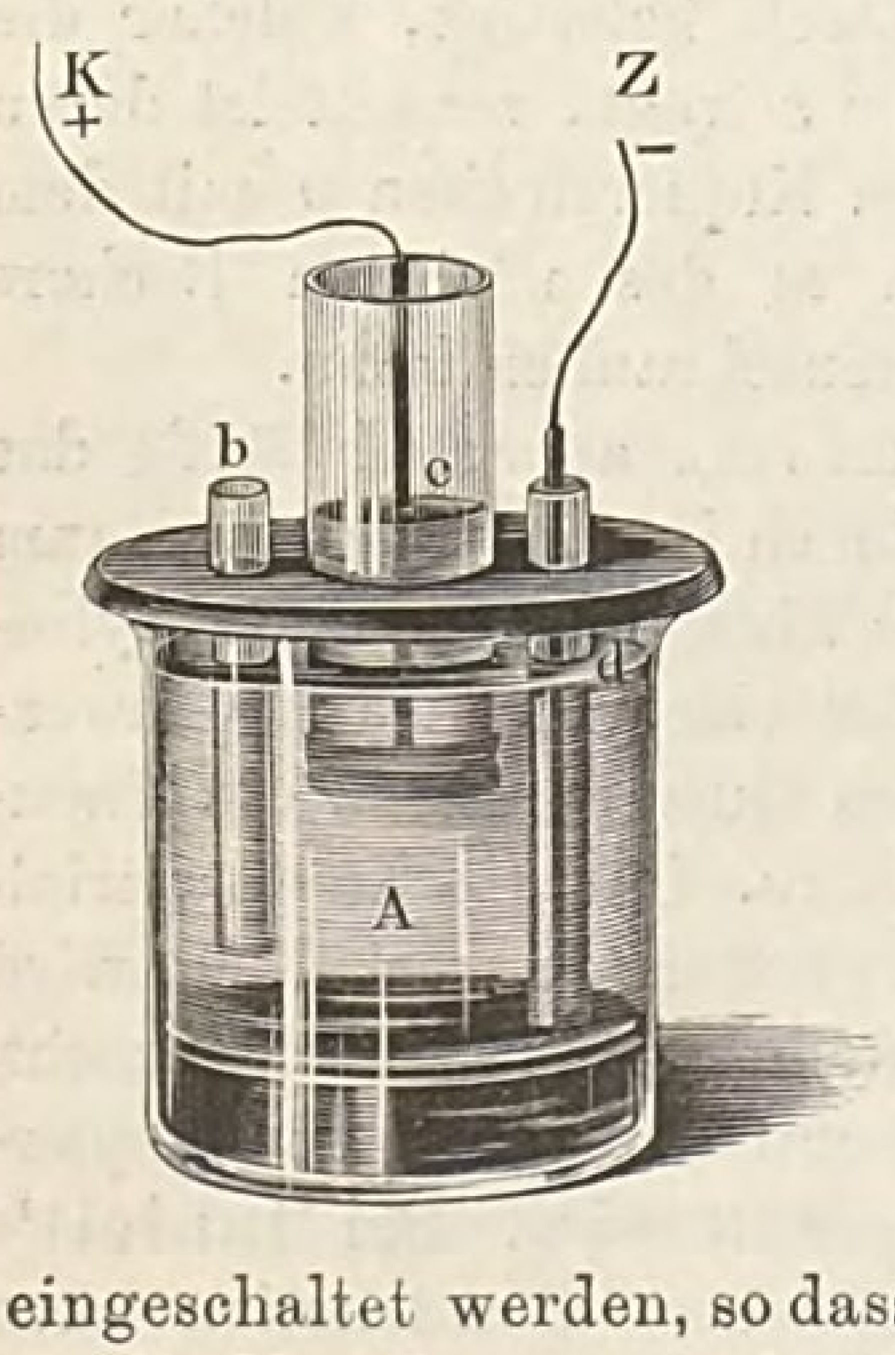
Man setzt aber auch häufig das Kupferblech in den äusseren Raum und das Zink in Form eines Cylinders oder eines Blockes mit kreuzförmigem Querschnitt in die Thonzelle hinein. Um die Kupfervitriollösung gesättigt zu erhalten, wird auch oft ein Kupfersieb angebracht, welches mit Krystallen von Kupfervitriol gefüllt wird. Bei Daniell's ursprünglicher Construction war statt der Thonzelle eine Ochsengurgel in Anwendung, und ausserdem eine Röhre angebracht, durch welche man die gebildete Zinkvitriollösung abfliessen lassen konnte.

Die Daniell'sche Kette hat das Missliche, dass die Thonzellen nach längerem Gebrauche durch warzenförmige Inkrustationen aus Kupfer durchzogen und bedeckt werden, so dass sie oft ausgewechselt werden müssen. Das unreine käufliche Zink setzt nämlich bei seiner Auflösung einen Schlamm, bestehend aus Kohle und fremden Metallen, ab, welcher den Boden und den unteren Theil der Thonzelle überkleidet, die zu ihm hindurch diffundirende Kupfervitriollösung unter Ausscheidung von metallischem Kupfer zersetzt und so eine secundäre Kette bildet, welche störend einwirkt. Man vermeidet diesen Uebelstand zum Theil, indem man den unteren Theil der Thonzelle mit Stearin tränkt, den gebildeten Schlamm öfters entfernt und das Zink nicht direct die Wände der Thonzelle berühren lässt.

Von den zahlreichen Modificationen der Daniell'schen Kette wollen wir noch einige erwähnen:

Buff hat, um lange Zeit hindurch constante Ströme, wenn auch von geringerer Stärke, zu erhalten, der Daniell'schen Kette folgende Form gegeben. Das Glas *A*, Fig. 303, ist mit einem Deckel bedeckt, durch welchen drei Glasröhren hindurchgehen; *b* und *d* sind oben und unten offen. Das weitere Glasrohr *c*, welches unten mit einer Thierblase zugebunden ist, enthält eine Lösung von Kupfervitriol, in welche ein Kupferstäbchen eingetaucht ist. Der Boden des Glasgefässes *A* ist mit Quecksilber bedeckt, unter dessen Niveau das untere Ende der Röhre *d* hinabreicht, durch welche ein Zinkstäbchen eingeführt wird. Durch das über dem Quecksilber mündende Rohr *b* wird eine Lösung von Zinkvitriol eingegossen, bis die poröse Wand, welche das Rohr *c* unten schliesst, ganz von derselben bespült ist.

Fig. 303.



Solche Elemente werden häufig als Normaldaniellelemente benutzt, um zur Messung elektromotorischer Kräfte zu dienen. Da die Thierblase nicht haltbar ist und sonstige Nachtheile mit sich bringt so sind zu Messungen verschiedene Formen des Daniell'schen Elementes construirt worden, bei welchen die Flüssigkeiten ohne poröse Zwischenwand lediglich durch ihr verschiedenes specifisches Gewicht getrennt gehalten werden. Um die Vermischung durch Diffusion wenigstens eine Zeit lang aufzuhalten, müssen lange Flüssigkeitssäulen eingeschaltet werden, so dass innerhalb der Versuchsdauer die unmittelbar an die Metalle grenzenden Lösungen keine Aenderung ihrer Zusammensetzung erleiden. Man verbindet z. B. zwei Gefässe, deren eines Kupfer in Kupfervitriol, das andere Zink in Zinkvitriol enthält, durch einen gläsernen Heber, den man mit der specifisch leichteren Flüssigkeit anfüllt.

Die zweckmässigste Form des Normaldaniell dürfte wohl jene von Fleeming sein, welche in Fig. 304 abgebildet ist*). An einem verticalen Brette ist die U-förmige Glasröhre mit den ersichtlichen Fortsätzen, welche oben zu zwei trichterförmigen Gefässen führen, befestigt. Ein Stab *Z* aus chemisch reinem (nicht amalgamirtem) Zink und ein Stab *Cu* aus chemisch reinem Kupfer stecken mittelst Korken in den beiden Schenkeln der U-Röhre. Der linksseitige Trichter wird mit Zinksulfatlösung (55,5 Thle. Zinksulfat in 44,5 Thln. Wasser) vom specif. Gew. 1,2 (bei 20⁰) gefüllt, der rechtsseitige mit Kupfersulfatlösung (16,5 Thle. Kupfersulfat in 83,5 Thln. Wasser) specif. Gew. 1,1 (bei 20⁰). Nachdem die Hähne h und h_3 geschlossen, wird h_1 geöffnet, bis die Zinklösung die Höhe g erreicht hat, dann auch h_2 geöffnet und die Schenkel bei gelüfteten Korken ganz angefüllt. Nach dem Schliessen von h_1 und h_2 setzt man die Korke fest ein. Sollte bei g die Trennung der Flüssigkeiten keine scharfe sein, so lässt man, während h_1 und h_2

Fig. 304.

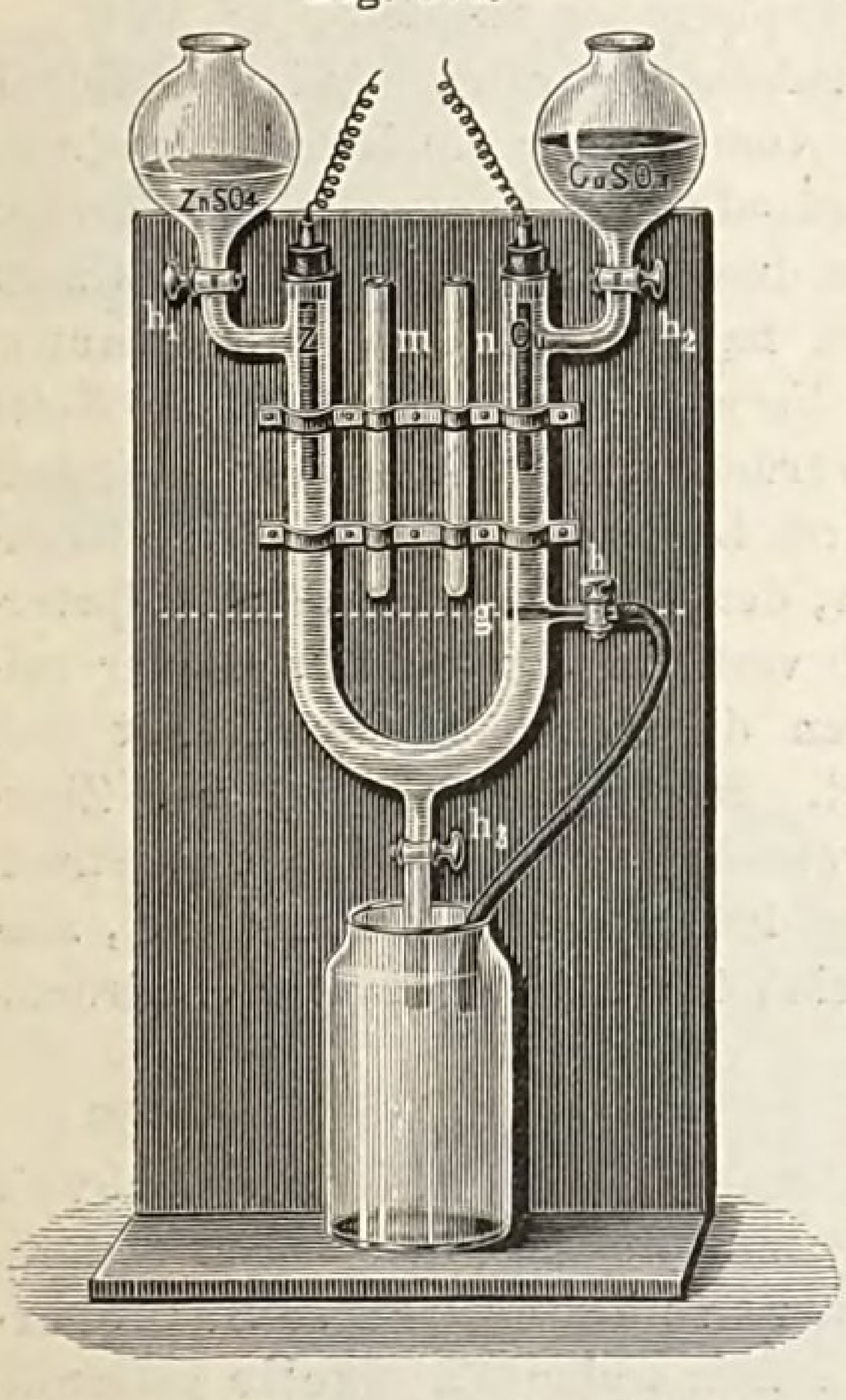
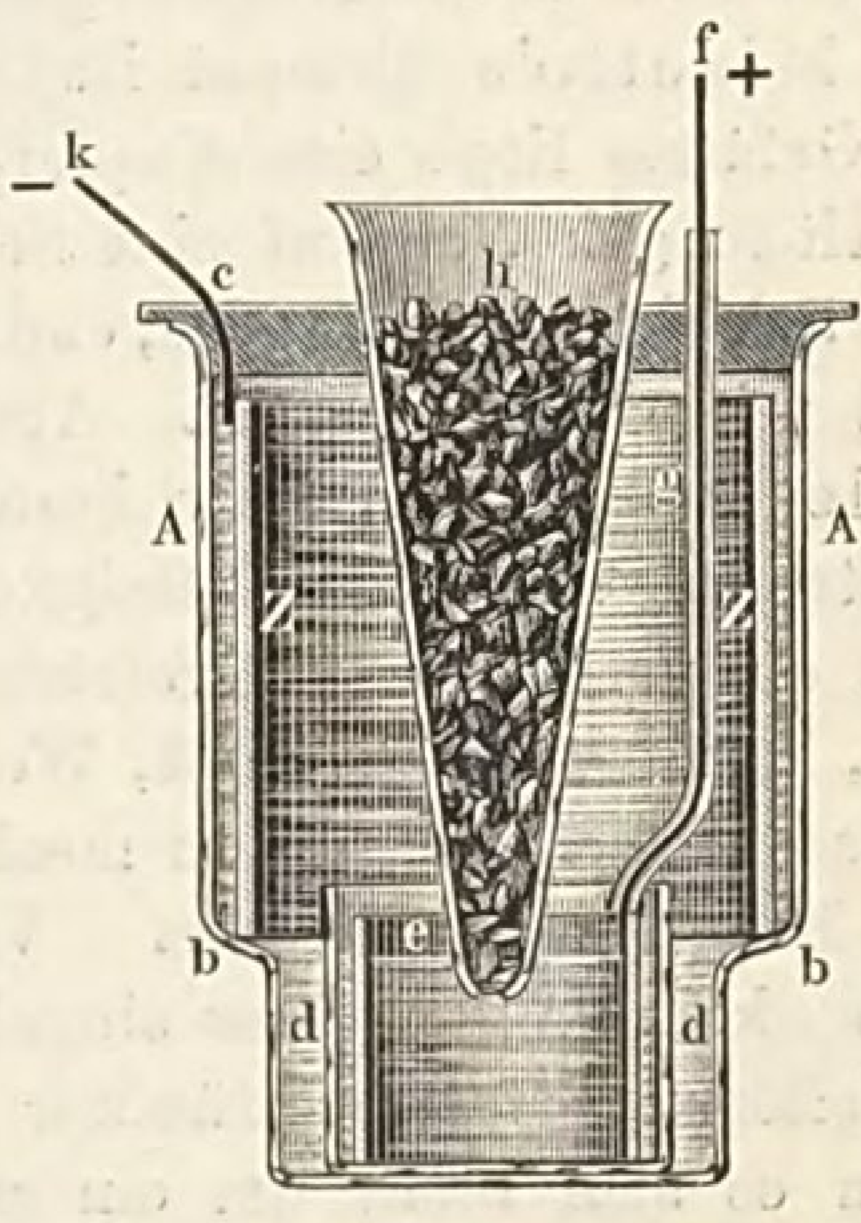


Fig. 305.



geöffnet sind, bei h ausfliessen, bis die Grenze wieder scharf ist, und schliesst dann wieder h_1 und h_2. Wenn das Element nicht gebraucht wird, setzt man die Metallstäbe in die Glasröhren m und n und verkorkt die Schenkelmündungen. Als elektromotorische Kraft bei 20⁰ wird 1,072 Volt angegeben.

Meidinger hat die poröse Scheidewand auf folgende Weise entbehrlich gemacht. In ein unten sich verengendes Glasgefäss A, Fig. 305, ist der Zinkring Z eingesetzt, während sich der Kupferring e in einem Glasgefässe d befindet, welches auf dem Boden von A steht. Der

*) Zu beziehen von Ebermayer in München, Marienstrasse.

Zuleitungsdraht von e ist von einer isolirenden Guttaperchahülle oder von einer Glasröhre umgeben. Das Gefäss A ist mit einer Lösung von Bittersalz gefüllt, welche das Zink umspült, und in derselben hängt, vom Deckel des Gefässes getragen, ein Glastrichter h herab, welcher mit Stücken von Kupfervitriol gefüllt ist und dessen nach unten gerichtete Oeffnung mit einem Korke verschlossen ist, in dessen Umfang einige Rinnen eingeschnitten sind. Wegen ihres grösseren specifischen Gewichtes diffundirt die Lösung des Kupfervitriols nur äusserst langsam in der Bittersalzlösung. Solche Elemente können ein Jahr lang in Thätigkeit sein, ohne einer Nachfüllung zu bedürfen, und werden insbesondere zum Telegraphiren benutzt.

Bei neueren Elementen dieser Art wird der Glastrichter h durch einen mit Kupfervitriolkrystallen gefüllten Glasballon ersetzt, dessen Hals nach abwärts in die Kupfervitriollösung e eingesenkt ist. Man heisst diese Elemente Ballonelemente.

Siemens' Element ist dem Meidinger'schen ähnlich, aber complicirter, da es ein Diaphragma von Papiermasse enthält.

Minotto's Element ist sehr einfach construirt. Auf dem Boden des Gefässes liegt eine Kupferplatte, von welcher ein isolirter Draht in die Höhe geht, darauf eine Schicht gepulverten Kupfervitriols, darüber eine Schicht feinen Sandes, endlich auf diesem der Zinkblock. Das Ganze wird mit Wasser gefüllt. Ausserdem haben noch Candido, Pincus, Rollet und viele Andere besondere Formen der Daniell'schen Kette construirt. Auch die Flüssigkeiten wurden zum Theil vertauscht, indem man die verdünnte Schwefelsäure durch Lösungen von Bittersalz, Kochsalz, Salmiak, Zinkvitriol, Weinstein, den Kupfervitriol durch salpetersaures Kupferoxyd, durch mechanisch vertheiltes kohlensaures oder reines Kupferoxyd ersetzte. Von allen diesen Abänderungen hat sich jedoch keine allgemeiner eingebürgert. Nur die Anwendung von Zinkvitriollösung statt verdünnter Schwefelsäure gewährt einen Vortheil, wenn es sich nicht um ein möglichst kräftig wirkendes Element, sondern um ein solches von genau bestimmter und constanter elektromotorischer Kraft handelt.

115 **Die Grove'sche und die Bunsen'sche Kette.** Grove's Kette besteht aus amalgamirtem Zink und aus Platin, wovon ersteres in verdünnte Schwefelsäure, letzteres in concentrirte Salpetersäure taucht; die beiden Säuren sind durch eine Thonzelle getrennt.

Fig. 306 stellt einen derartigen Grove'schen Becher dar. In einem runden Glasgefässe, welches die verdünnte Schwefelsäure enthält, steht der hohle Zinkcylinder. Innerhalb desselben steht die poröse Thonzelle, welche mit Salpetersäure gefüllt wird und in welche das Platinblech eingetaucht ist. Das Platinblech ist, wie man aus Fig. 307 deutlicher sieht, an einem runden Brettchen befestigt, welches gleichsam den Deckel für die Thonzelle bildet. In diesem Deckel steckt ein

Stückchen Kupferblech, an welchem unten das Platinblech befestigt ist, während es oben eine Schraubklemme trägt. Eine ähnliche Schraubklemme ist auf dem Zinkcylinder aufgesetzt. Diese Schraubklemmen dienen zur Verbindung der einzelnen Elemente.

Fig. 306.

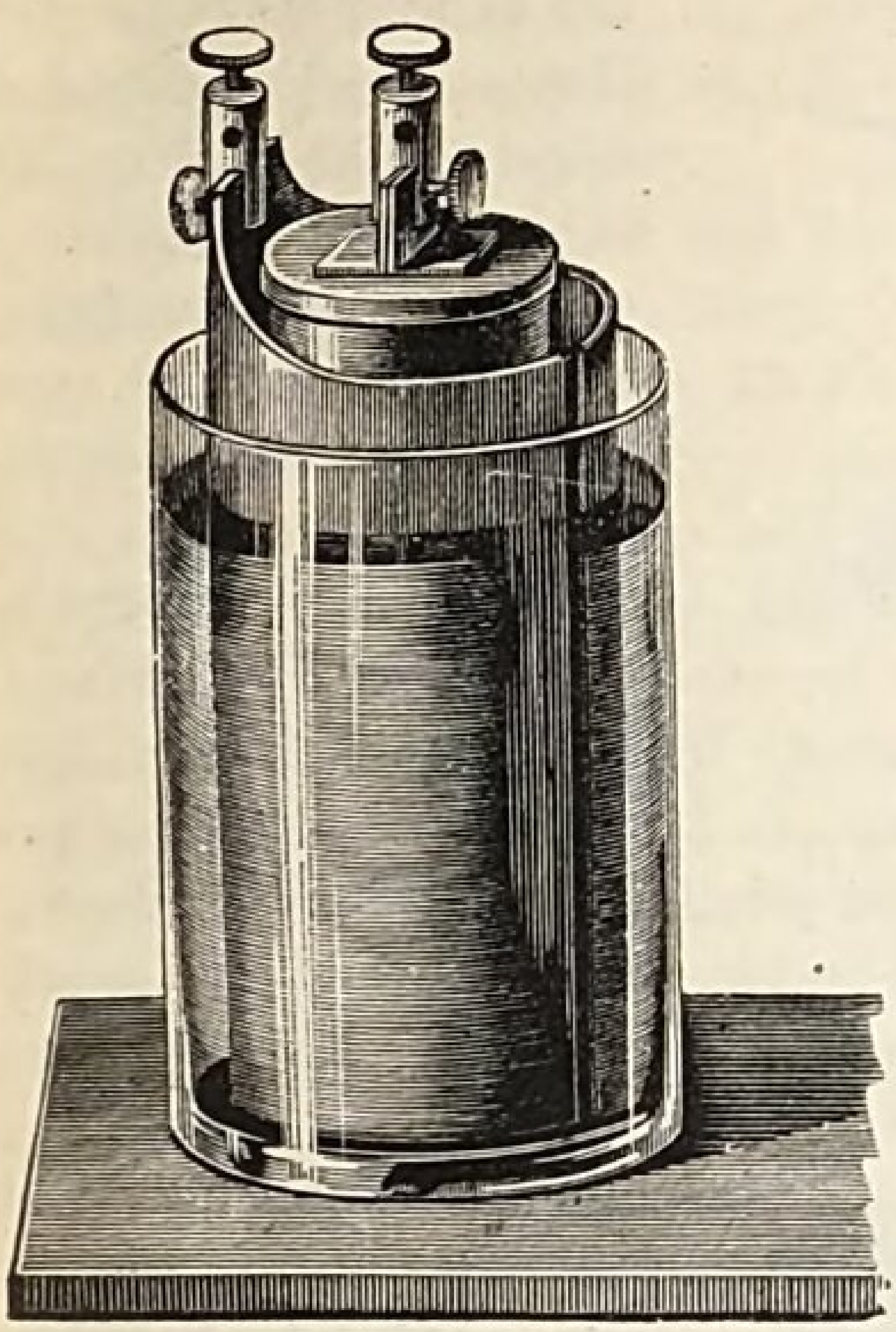


Fig. 307.

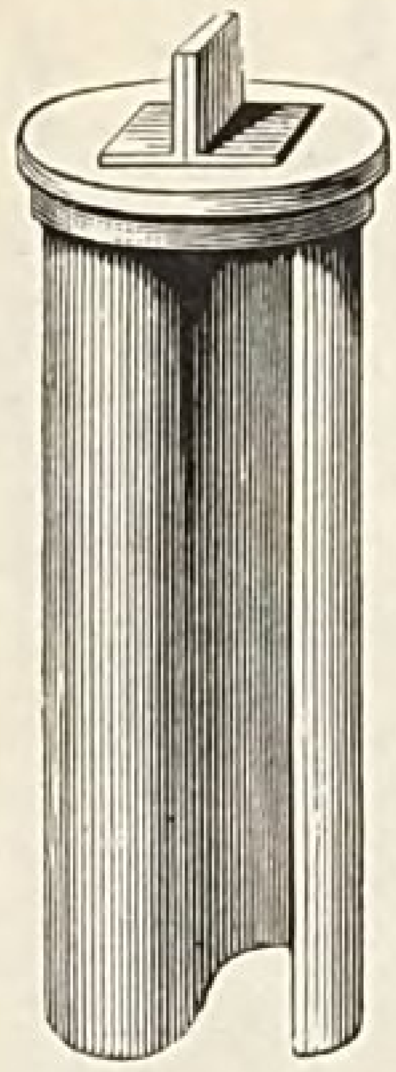
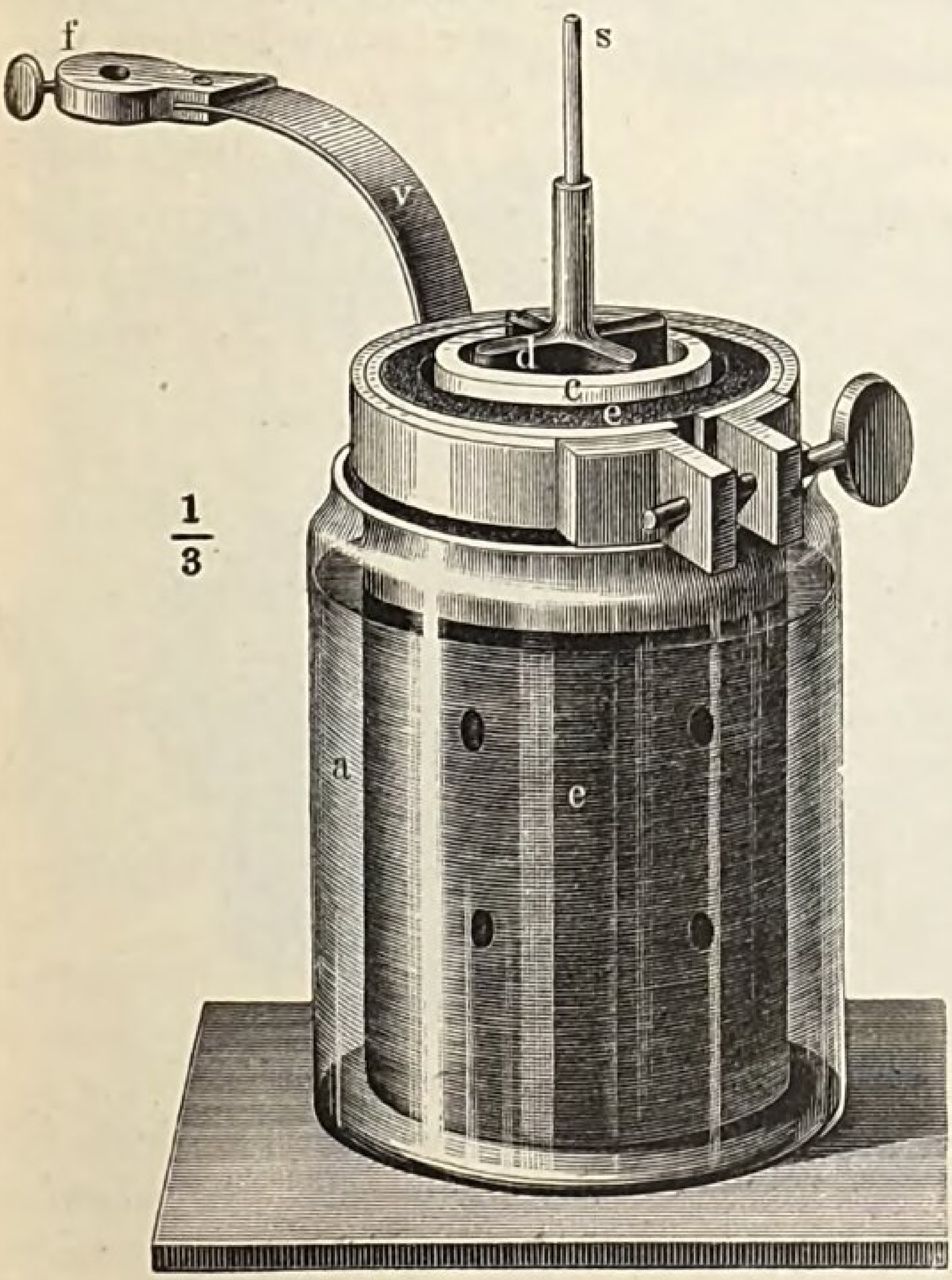


Fig. 308.

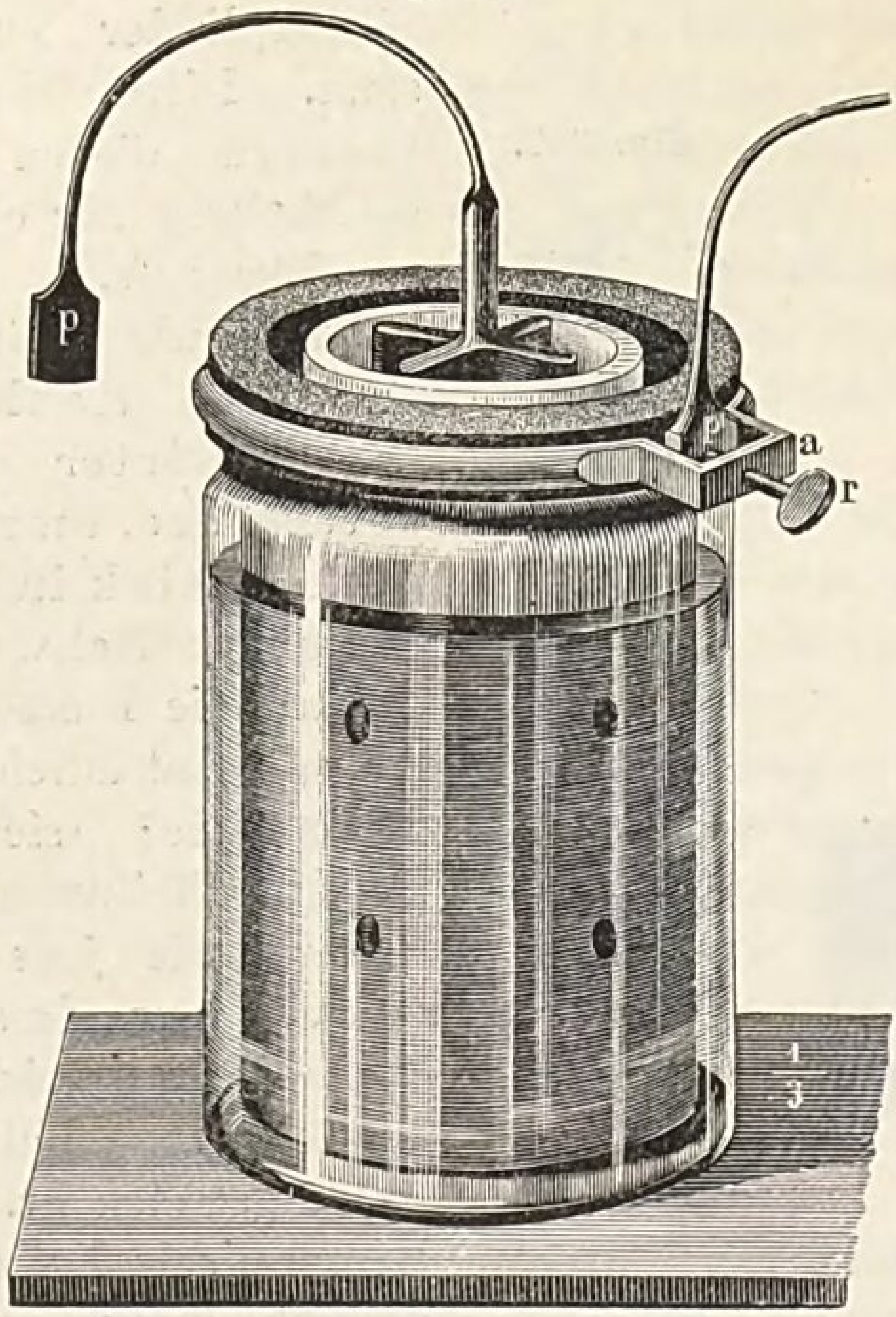


Bunsen's Kette besteht aus Kohle in concentrirter Salpetersäure, amalgamirtem Zink in verdünnter Schwefelsäure, die Flüssigkeiten getrennt durch eine Thonzelle; sie hat also dieselbe Zusammensetzung wie jene von Grove, nur dass an Stelle des kostspieligen Platins die billigere Kohle getreten ist. Die Bunsen'sche Kette hat deshalb sowie wegen ihrer kräftigen Wirkung die grösste Verbreitung gefunden und wird fast ausschliesslich in allen den Fällen zur Anwendung gebracht, wo es sich um Herstellung sehr kräftiger Ströme durch galvanische Batterien handelt.

Die äussere Form der Bunsen'schen Kette ist dieselbe wie bei Daniell's oder Grove's Kette. Bei den älteren Bunsen'schen Elementen steht jedoch die Kohle in dem äusseren Raum und das Zink innerhalb der Thonzelle,

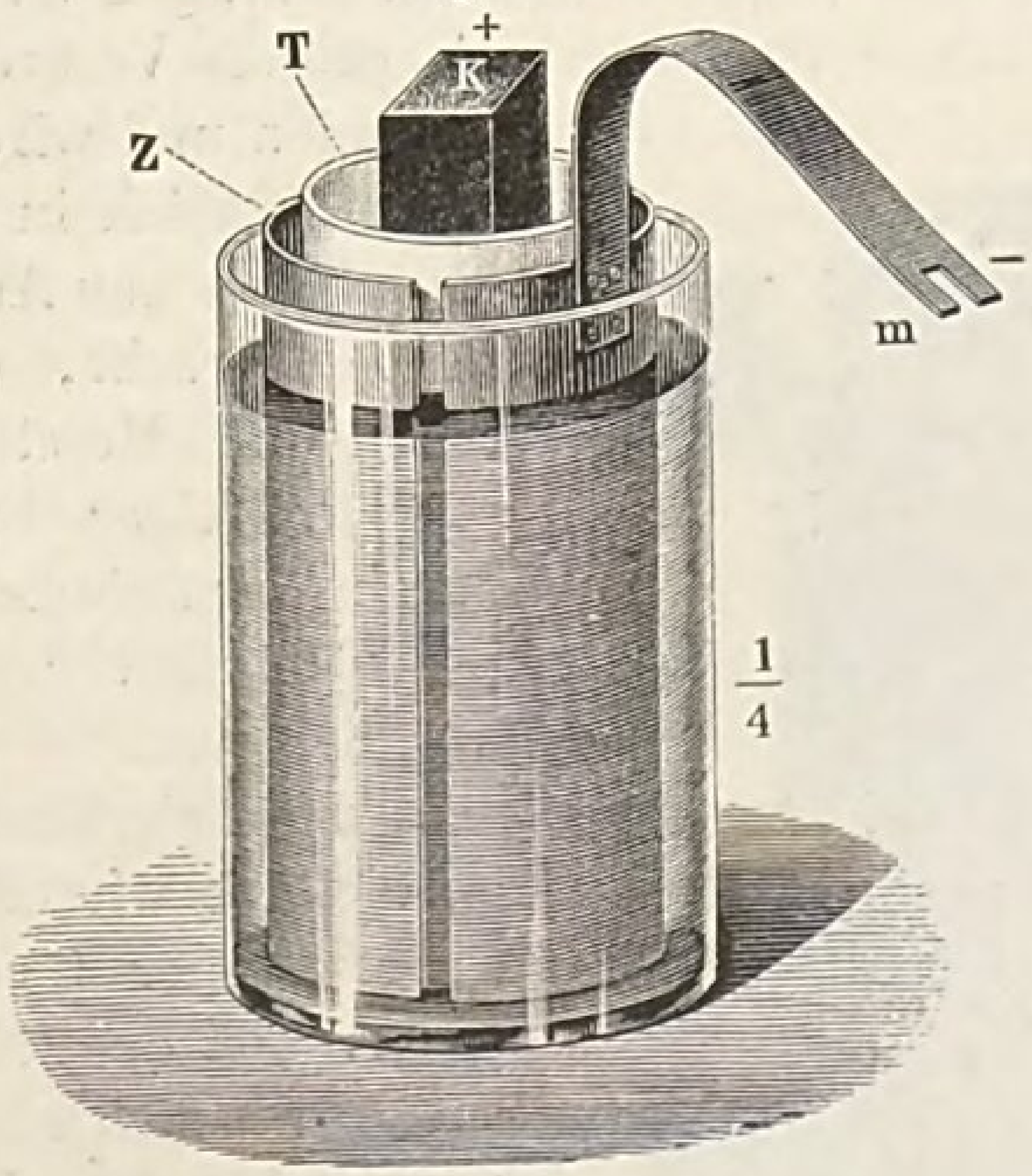
während man in neuerer Zeit die umgekehrte Anordnung vorzieht. Fig. 308 (a. v. S.) stellt die zur Verbindung mehrerer Elemente sehr bequeme Form dar, welche Siemens und Halske den Bunsen'schen Bechern gegeben haben. Um den oberen Rand des Kohlencylinders ist zunächst ein Bleiring und um diesen der Kupferring gelegt.

Fig. 309.



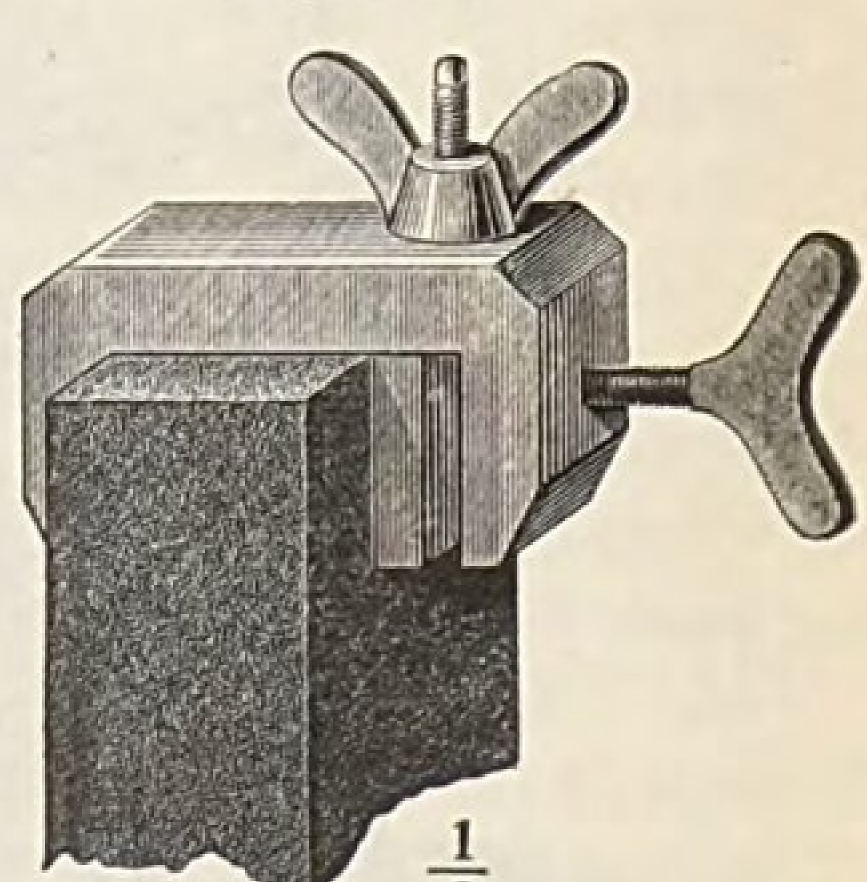
Das Anlegen und Abnehmen der Kupferringe, sowie das Reinigen derselben, welches eine lästige zeitraubende Arbeit ist, wenn man es mit einer aus vielen Bechern zusammengesetzten Säule zu thun hat, hat Stöhrer durch die in Fig. 309 dargestellte Einrichtung des Bunsen'schen Bechers vermieden.

Fig. 310.



Um den oberen Rand des Kohlencylinders ist ein starker messingener Ring gelegt, welcher

Fig. 311.



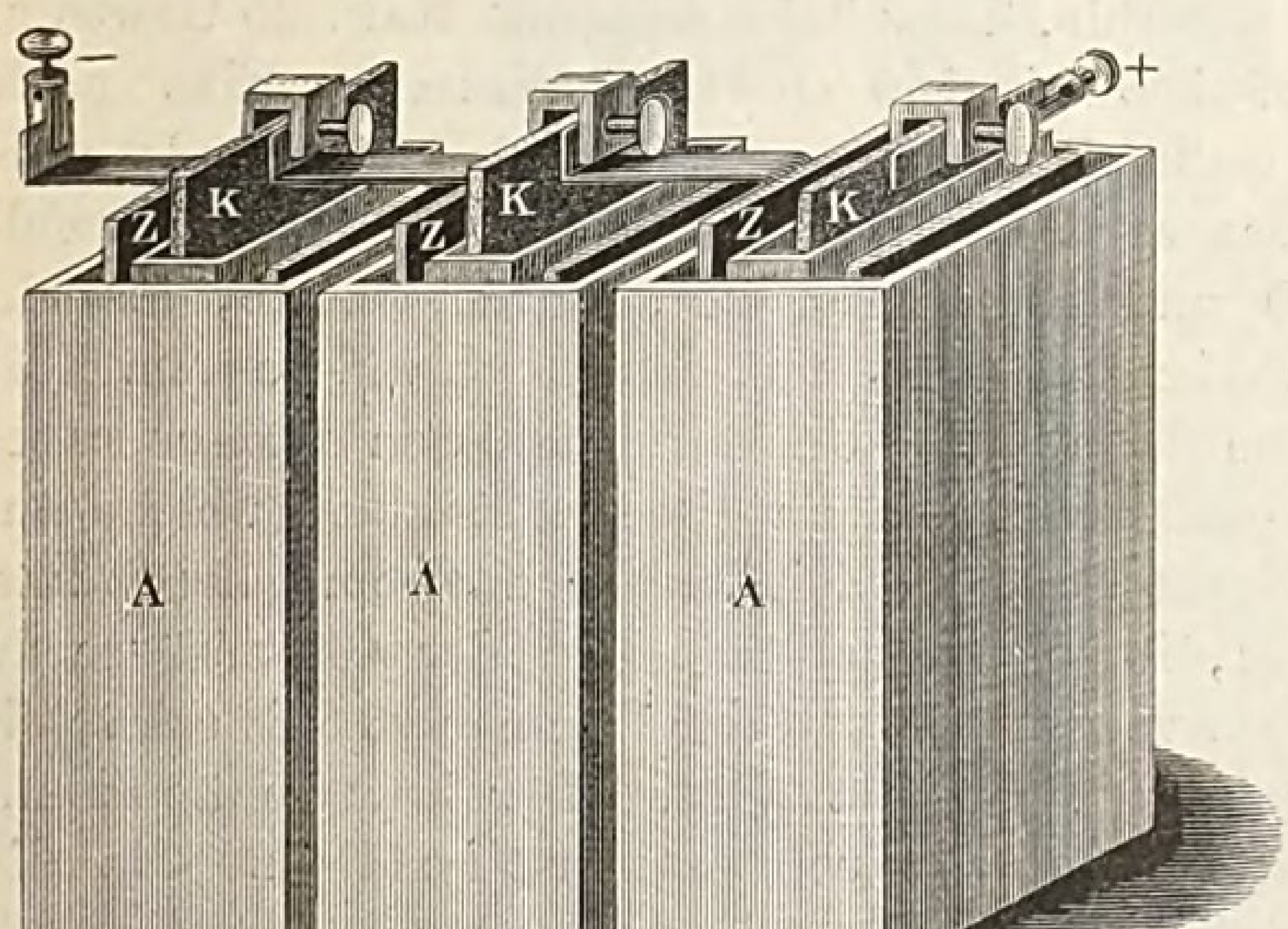
ein- für allemal festsitzt. Da wo dieser Ring an die Kohle anliegt, ist er stark gefirnisst, so dass er zur Stromleitung nicht beiträgt; bei *a* ist er mit einer viereckigen Ausbiegung versehen. An jedem Zinkcylinder,

welcher, wie die Figur zeigt, einen kreuzförmigen Querschnitt hat, ist ein weicher Kupferdraht befestigt, welcher mit einer etwa 2 mm dicken Kupferplatte *p* endigt. Die Platte *p'*, welche mit dem Zink des vorhergehenden Bechers zusammenhängt, wird nun in die viereckige Ausbiegung *a* eingesetzt und durch die Schraube *r* fest gegen die Kohle dieses Bechers angepresst.

Die Kohlencylinder der Bunsen'schen Batterie müssen aus einer dichten, festen Masse verfertigt sein. Man erhält eine solche dadurch, dass man ein Gemenge von Steinkohlen und Coaks in einem verschlossenen Tiegel glüht; die so erhaltene Masse wird mit einer concentrirten Zuckerlösung getränkt und zum zweiten Male in einem verschlossenen Tiegel geglüht, wodurch sie eine steinartige Festigkeit erlangt.

Die neuere von Deleuil stammende Form des Bunsen'schen Elementes ist in Fig. 310 abgebildet. Die dabei angewandte Kohle ist sogenannte Gaskohle, d. h. solche Kohle, welche sich an den Innenwänden der thönernen Retorten der Leuchtgasfabrikation absetzt und wegen ihrer Härte und guten Leitungsfähigkeit besonders gut eignet. Man sägt dieselbe in rectanguläre Stäbe oder Platten und setzt dieselben in das Innere der Thonzelle, während das Zink aussen herumreicht. Fig. 311 zeigt die Messingarmatur, mittelst welcher man die Verbindungskupferstreifen anklemmen kann. Man kann jedoch auch die Kohlenprismen mit einem Loche versehen, in welches ein Kupferconus eingesetzt wird, oder welches man mit Quecksilber füllt, in welches dann die Verbindungsdrähte eingetaucht werden.

Fig. 312.



In England wird das Bunsen'sche Element auch in der compendiösen parallelepipedischen Form, Fig. 312, angewandt, doch sind die so geformten Thonzellen schwierig herzustellen.

Beim Gebrauche der Bunsen'schen Kette ist insbesondere darauf zu achten, dass das Zink recht gut amalgamirt sei. Nach v. Waltenhofen empfiehlt es sich sehr, auf den Boden des Glasgefässes eine Schicht Quecksilber zu giessen, so dass die Zinkbleche stets in dasselbe eintauchen und sich so von selbst gut amalgamirt erhalten. Die Ausgabe für das Quecksilber wird durch Zinkersparniss aufgewogen. Die Salpetersäure soll ein specif. Gew. 1,3 bis 1,4 haben. Die verdünnte Schwefel-

säure braucht nicht stärker zu sein, als vom specif. Gew. 1,06, d. h. etwa ein Raumtheil englische Schwefelsäure auf 20 Raumtheile Wasser. Beim Mischen giesst man die Schwefelsäure in das Wasser und nicht umgekehrt. Es ist zu empfehlen, zuerst die verdünnte Schwefelsäure in das Batteriegefäss zu giessen und erst zuletzt, wenn die Thonzellen damit durchfeuchtet sind, die Salpetersäure einzufüllen, damit von derselben möglichst wenig zum Zink gelange. Nach dem Gebrauche müssen die Thonzellen gut ausgewässert werden, da sie sonst durch Krystallisation der Salze zerstört werden.

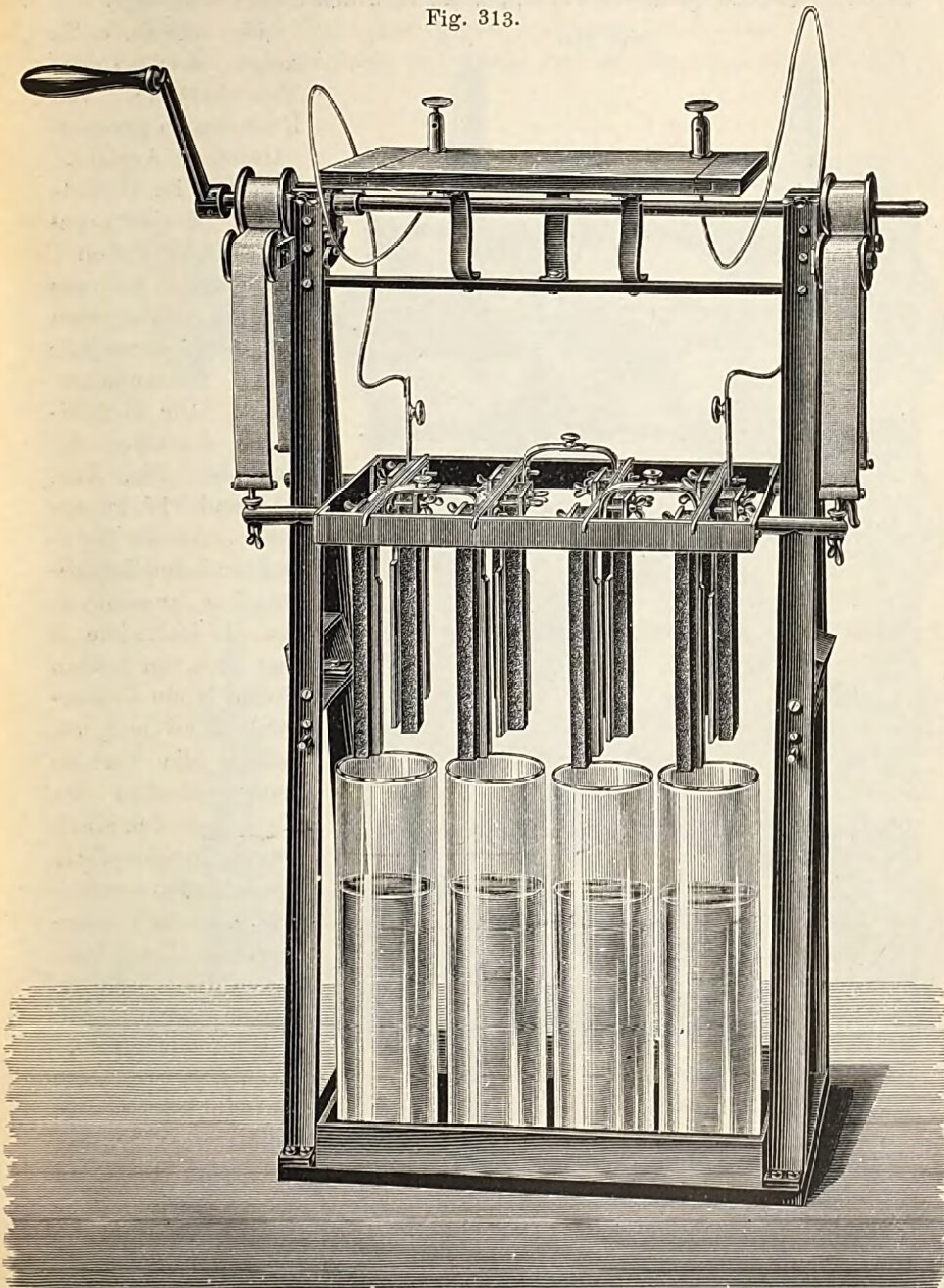
Die Bunsen'sche wie die Grove'sche Kette haben eine beinahe doppelt so grosse elektromotorische Kraft als die Daniell'sche und sind ebenso constant, bis die Salpetersäure zu verdünnt geworden ist, aber sie haben einen Uebelstand, der ihre Anwendung in bewohnten Räumen verbietet. Sie verbreiten nämlich abscheuliche Dämpfe von Untersalpetersäure, welche giftig sind, und ausserdem alle Metallgegenstände angreifen, insbesondere alles Eisen rosten machen. Man darf sie daher nur in gut ventilirten Räumen aufstellen. Bunsen hat deshalb eine Modification dieser Kette erfunden, welche unter dem Namen der Chromsäurekette bekannt ist.

116 **Die Chromsäurekette.** Dieselbe beruht darauf, die Salpetersäure der gewöhnlichen Bunsenkette durch die Chromsäure, welche ebenfalls ein grosses Oxydationsvermögen besitzt, zu ersetzen. Da jedoch die reine Chromsäure ziemlich theuer ist, so verwendete Bunsen eine Flüssigkeit aus 12 Gewthln. doppeltchromsaurem Kali, 25 Gewthln. Schwefelsäurehydrat auf 100 bis 150 Gewthle. Wasser. Eine noch wirksamere Flüssigkeit stellte Bunsen später her, indem er 92 g pulverisirtes doppeltchromsaures Kali mit 93,5 ccm concentrirter Schwefelsäure, das Pulver nach und nach zusetzend, zusammenrieb, bis ein gleichförmiger Brei von Chromsäure mit doppeltschwefelsaurem Kali entstanden war, welchem dann unter Umrühren 900 ccm Wasser zugesetzt wurden, bis Alles gelöst war. Wenn diese Flüssigkeit, welche anfangs schön gelbroth gefärbt ist, eine Zeit lang den Strom geleitet hat, so färbt sie sich dunkel, indem unter Reduction der Chromsäure in Chromoxyd ein Doppelsalz von schwefelsaurem Chromoxyd mit schwefelsaurem Kali, der Chromalaun, gebildet wird. Der letztere überzieht dann auch oft die Platten in Form von grünen Krystallen. Da die chromsäurehaltige Flüssigkeit das Zink nicht stärker angreift als Schwefelsäure, so kann man die Thonzelle ganz entbehren, indem man Kohle und Zink in dieselbe Flüssigkeit taucht*). Die dadurch erreichte Vereinfachung des Elements und die Geruchlosigkeit desselben geben diesen Chromsäureketten als Zimmerbatterie einen Vortheil. Doch ist dieselbe

*) Um das Zink amalgamirt zu erhalten, kann man (nach Ducretet) der Lösung noch schwefelsaures Quecksilberoxyd, etwa $^1/_{40}$ des Kalisalzes, zusetzen.

weniger andauernd wirksam als die eigentliche Bunsenkette. Für den Gebrauch sehr zweckmässig sind die Tauchbatterien, welche ihren

Fig. 313.



Namen daher tragen, weil bei ihnen die Kohlen- und Zinkplatten oder manchmal nur die Zinkplatten so aufgehängt sind, dass sie in die bereits gefüllten Gefässe getaucht werden, wenn man den Strom benöthigt.

Fig. 314.

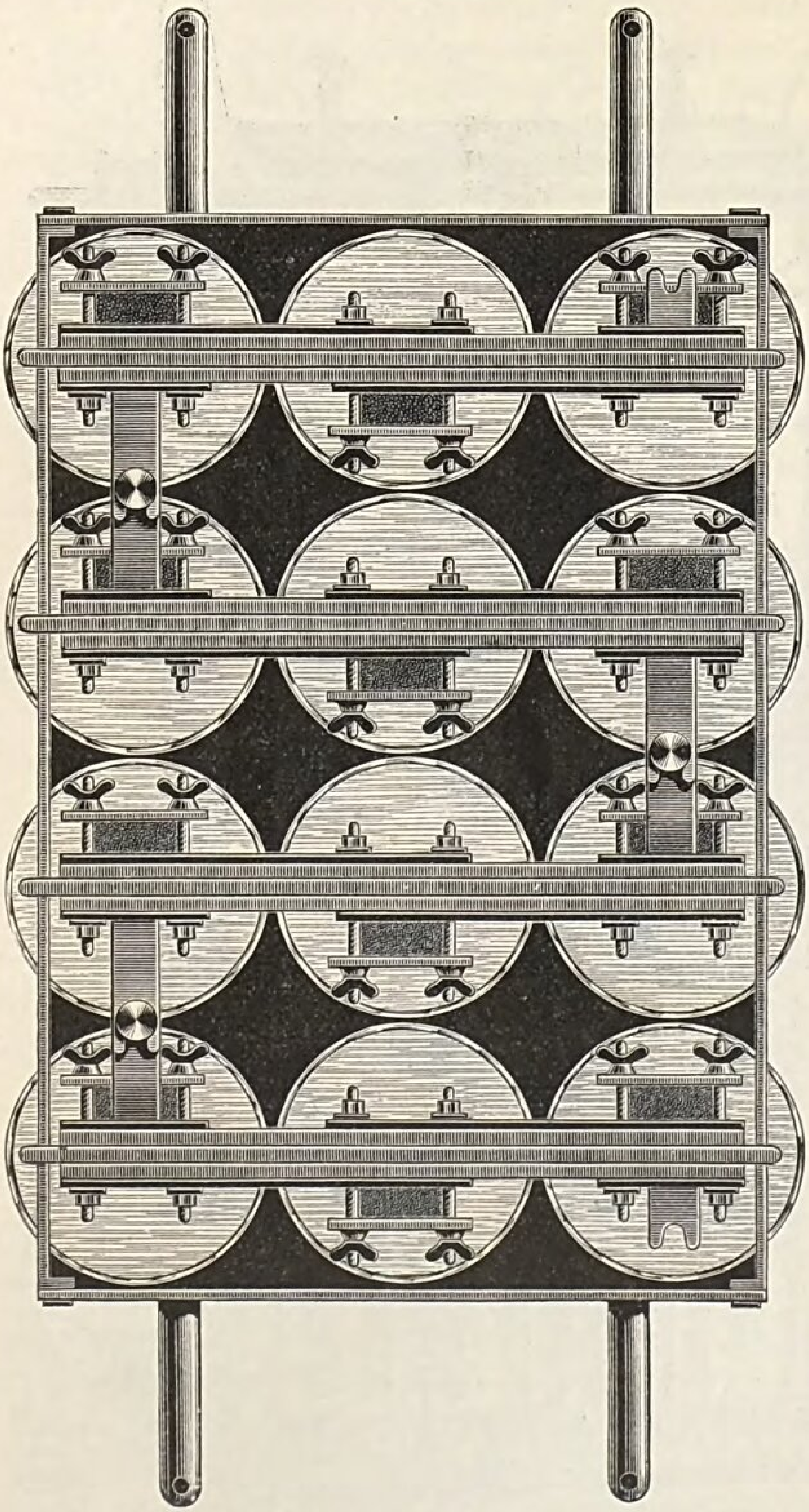


Fig. 313 (a. v. S.) zeigt eine solche Tauchbatterie von Bunsen in perspectivischer Ansicht, Fig. 314 im Grundriss. In einem gemeinschaftlichen horizontalen Rahmen sind vier Holzleisten eingesetzt, deren jede drei Plattenpaare trägt. Die Befestigung derselben ist aus den Fig. 315, 316 und 317 zu ersehen. An die Zinkplatten *Z* sind Kupferbügel *o* angelöthet. An die Holzleiste *H* legt sich von beiden Seiten je ein Kupferstreifen *cd* und *ab*, welche die Verbindung zwischen der Zinkplatte des einen mit der Kohlenplatte des nächsten vermitteln. An diese Kupferstreifen werden durch die Schrauben *ss* und *s′s′* und deren Schraubenmuttern *n*, *n′*, *f*, *f′* einerseits die Kohlenplatte *k*, andererseits der das Zink tragende Kupferbügel *o* angeschraubt. Die Gläser enthalten eine Flüssigkeit, welche per Element aus 155 g doppeltchromsaurem Kali, 157 ccm Schwefelsäure und 1512 ccm Wasser hergestellt wird. Diese Flüssigkeit enthält mehr Schwefelsäure, als zur Bildung von Chromalaun nothwendig ist. Die elektromotorische

Kraft dieser Kette ergab sich 2,3 mal so gross als die der Daniell'schen Kette und auch etwas grösser als die gewöhnliche Bunsen'sche. Beginnt die Stromstärke der Chromsäurekette nachzulassen, so kann sie durch Bewegen der Flüssigkeit, durch Ausheben der Platten, Umrühren oder Lufteinblasen nochmals auf einige Zeit wieder hergestellt werden.

Fig. 315.

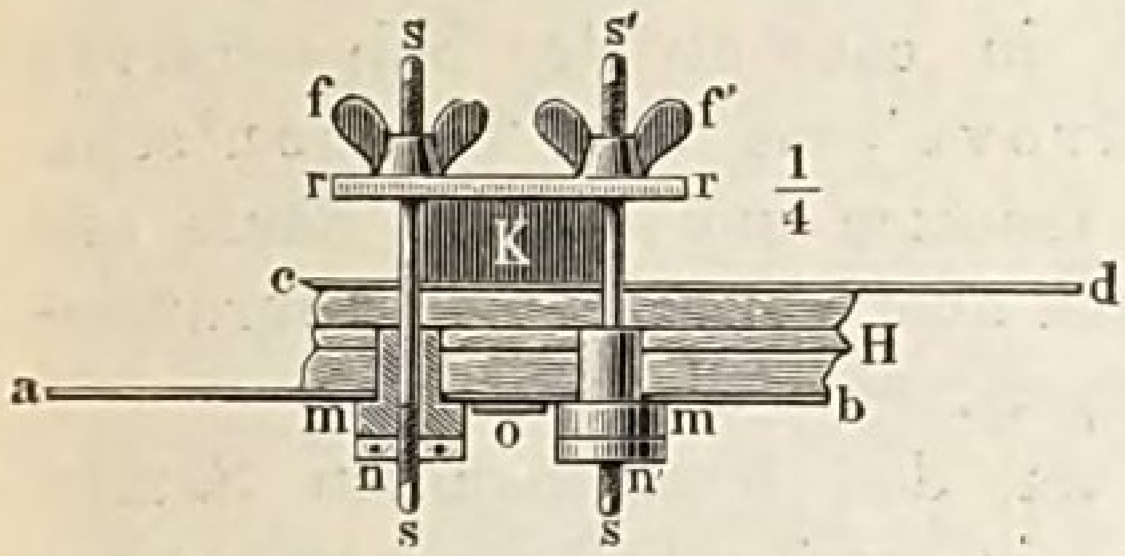


Fig. 316.

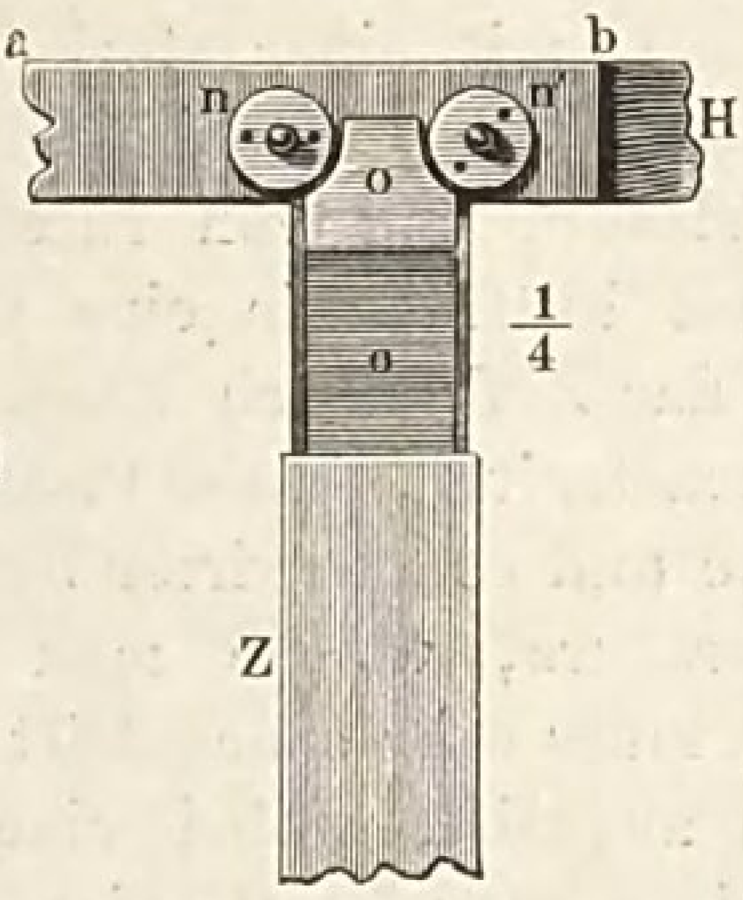
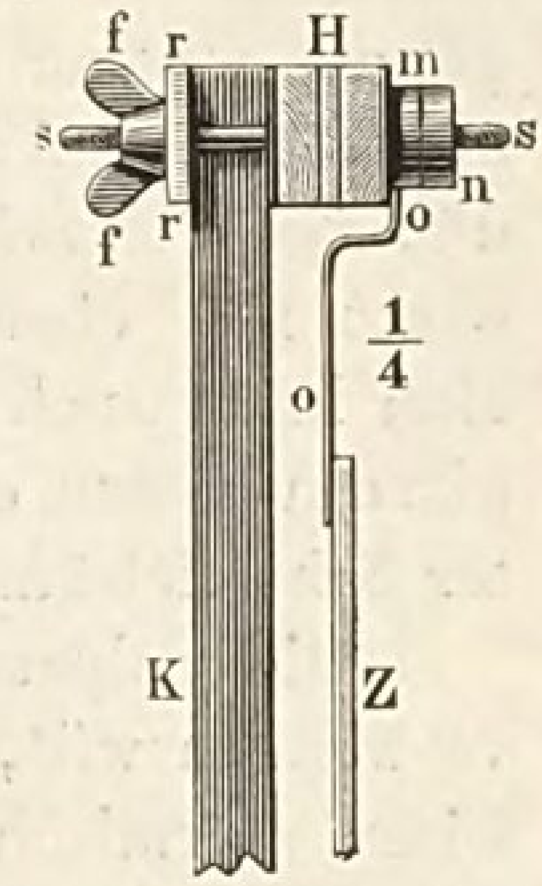
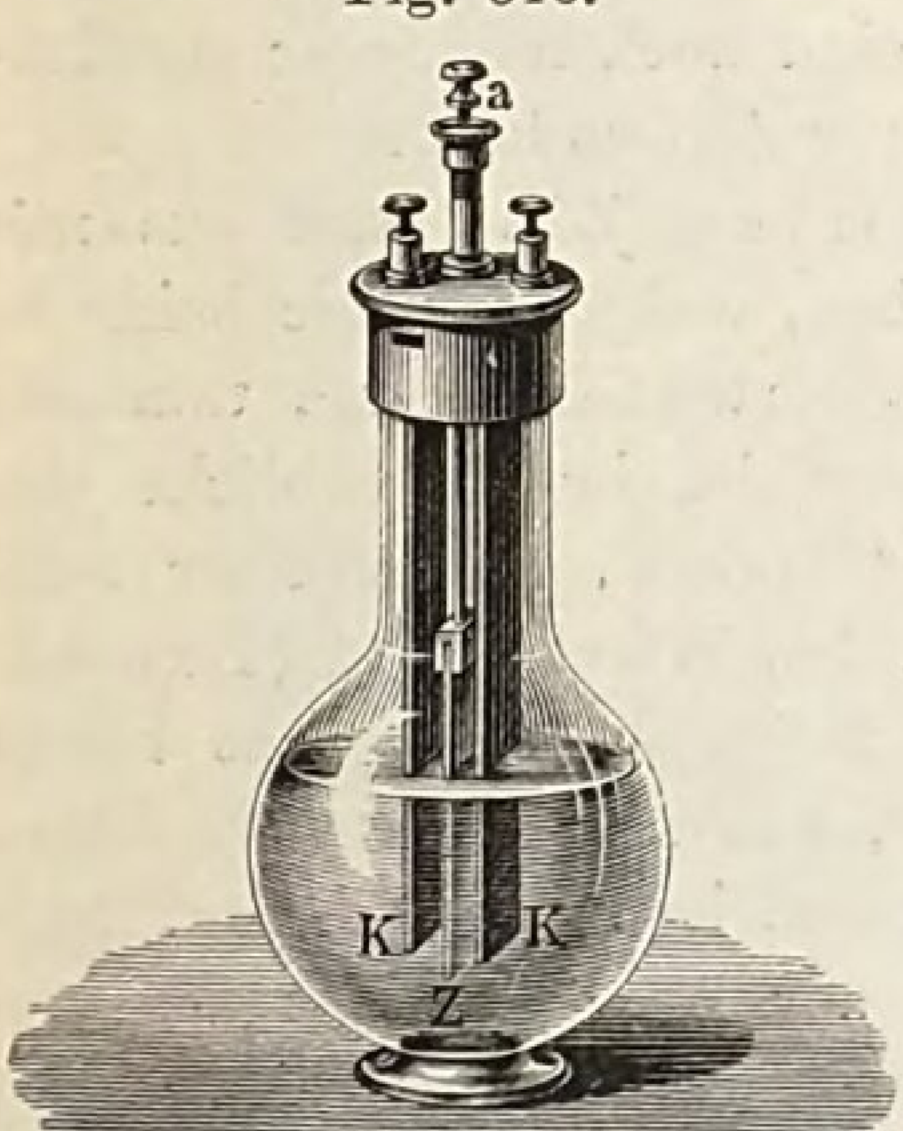


Fig. 317.



Eine bequeme Form des Chromsäureelements ist das sogenannte Flaschenelement (Fig. 318). Die Zinkplatte Z kann zwischen den Kohlenplatten k, k mittelst des Stabes a eingesenkt oder über das Flüssigkeitsniveau emporgezogen werden, wenn man das Element ausser Thätigkeit setzen will.

Fig. 318.



Unter den vielen vorgeschlagenen Modificationen der Bunsen'schen Kette wollen wir noch folgende erwähnen: Marié Davy ersetzte die Salpetersäure durch einen Brei von schwefelsaurem Quecksilberoxydul, Hg_2SO_4, und Wasser. Es wird dabei dieses Salz zersetzt, indem sich Quecksilber an der Kohle ausscheidet und Schwefelsäure frei wird.

Grenet machte bei diesem Elemente auch die Thonzelle entbehrlich, indem er die Kohle von dem Quecksilbersalz umgeben auf den Boden eines Gefässes lagerte und das Zink darüber in die Flüssigkeit hängte. Da ohnedies Schwefelsäure frei wird, so braucht man anfangs nur mit Wasser zu füllen. Die elektromotorische Kraft dieser Kette ist ungefähr gleich $1^1/_4$ Daniell.

Das wegen seiner constanten elektromotorischen Kraft oft zu Messungen benutzte Element von Latimer Clarke (Normalelement) besteht aus chemisch reinem Zink in einem steifen Brei aus Quecksilbersulfat und Zinkvitriollösung, dem ohne Diaphragma ein Platindraht gegenübersteht.

Das v. Helmholtz'sche Element besteht aus Zink, Chlorzinklösung (5 bis 10 Proc.), fein gepulvertem Quecksilberchlorür (Calomel) und Quecksilber.

Hawkins ersetzte das Platin der Grove'schen Kette durch Eisen, welches in concentrirter Salpetersäure nicht angegriffen wird.

Die Salpetersäure macht nämlich das Eisen passiv, d. h. das Eisen überzieht sich unter dem Einflusse der Salpetersäure, wie weiter unten gezeigt werden soll, mit einer stark elektronegativen Schicht, welche den weiteren Angriff der Säure hindert. Eine Säule von Zink in verdünnter Schwefelsäure und von Eisen in concentrirter Salpetersäure wirkt fast ebenso kräftig wie eine Grove'sche oder Bunsen'sche. Man kann auch das Zink durch Eisen ersetzen und so eine Säule aus einem Metall construiren, dessen Platten aber abwechselnd in verdünnter Schwefelsäure und concentrirter Salpetersäure stehen.

Die Salpetersäure, welche man zu den letztgenannten Säulen verwenden will, muss sehr concentrirt sein, weil schwächere Säure das Eisen stürmisch angreift, wobei eine bedeutende Entwickelung von Dämpfen salpetriger Säure stattfindet. Sobald dies eintritt, hört natürlich die elektromotorische Wirksamkeit des Apparates auf.

117 **Die Ketten von Smee, Leclanché und Pincus.** Ausser den bisher beschriebenen Ketten, welche, in der Mehrzahl der Fälle, zwei verschiedene Flüssigkeiten enthalten, sind noch nachfolgende Ketten mit nur einer Flüssigkeit in allgemeinerer Anwendung.

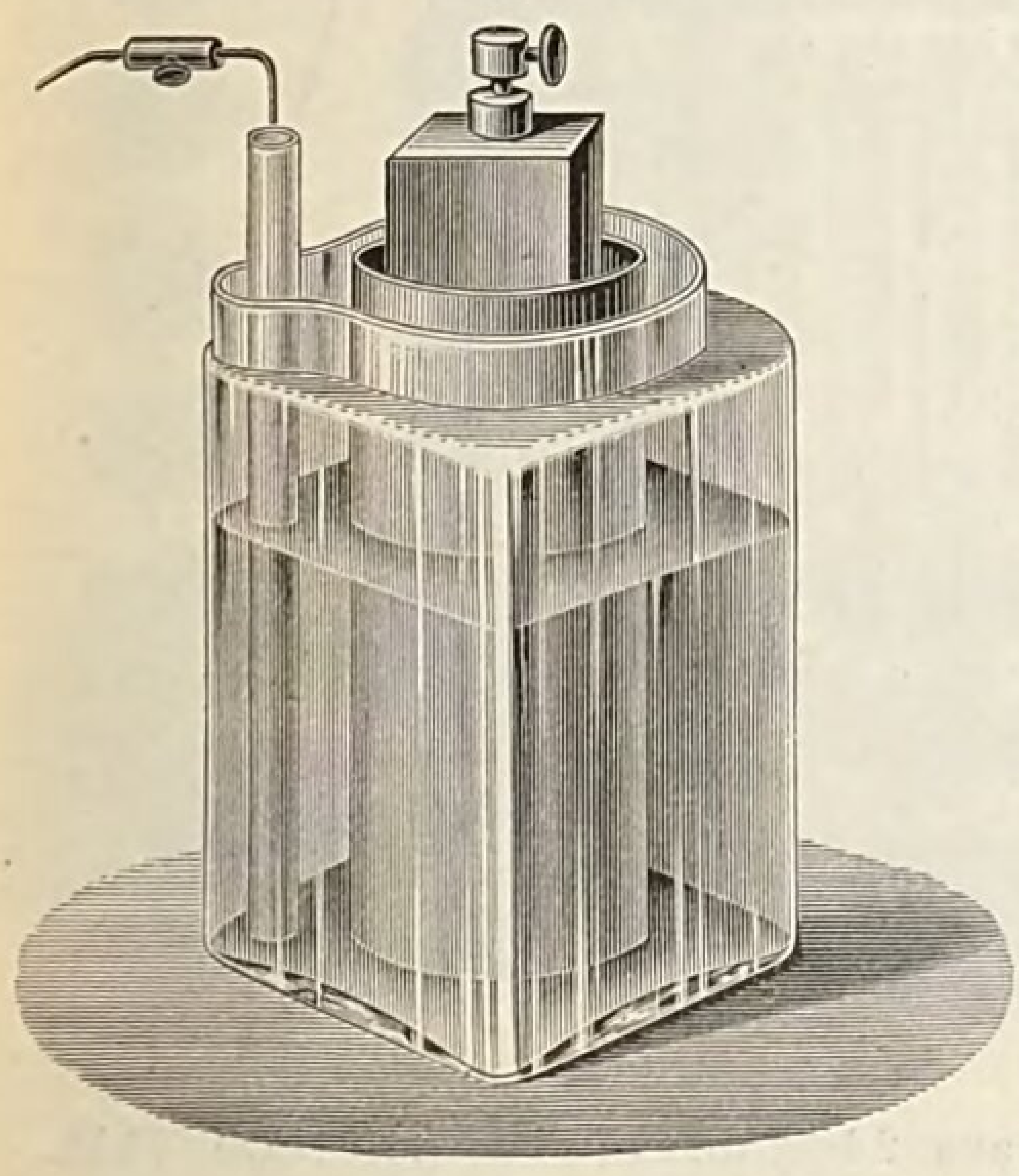
Smee's Kette besteht aus amalgamirtem Zink und aus mit Platinmohr überzogenem Platin oder Silber, welche Metalle beide in dieselbe Flüssigkeit, nämlich verdünnte Schwefelsäure, tauchen. Die elektromotorische Kraft dieses Elementes ist im Augenblicke des Stromschlusses grösser als die eines Daniell'schen, nimmt aber sehr rasch ab, erreicht dann in wenigen Minuten den Werth 0,731 (Daniell = 1 gesetzt), welcher längere Zeit (1 bis 2 Stunden) constant bleibt und erst dann langsam abzunehmen beginnt, wenn die verdünnte Säure merkliche Mengen von Zinkvitriol aufgenommen hat. Die rauhe, pulverige Oberfläche des Platinmohrs scheint der Adhäsion des Wasserstoffes und damit der Polarisation der Kette entgegen zu wirken.

Diese Elemente werden insbesondere als Tauchbatterie zu Vorlesungszwecken benutzt. Damit die Flüssigkeit nicht zu bald mit Zinkvitriol sich anreichert, werden die Glasgefässe viel tiefer genommen, als die eintauchenden Metallplatten. Das Platin- oder Silberblech kann auch durch platinirtes Blei ersetzt werden.

Leclanché's Kette ist unter allen Volta'schen Ketten, welche nicht so sehr auf möglichst starke Ströme, als vielmehr auf lang dauernde schwächere Ströme berechnet sind, die meist verbreitetste und empfehlenswertheste. Sie besteht aus gewöhnlichem Zink einerseits und einer Kohlenplatte andererseits, welche letztere mit einem Gemisch von grob-

gekörntem Braunstein und Coakspulver innerhalb einer Thonzelle umgeben ist; als Flüssigkeit dient Salmiaklösung. Die Thonzelle hat in diesem Falle keine Flüssigkeiten zu trennen, sondern nur das Braunsteinpulver zusammenzuhalten, sie kann daher auch durch eine durchlöcherte Zelle aus Guttapercha ersetzt werden. Die gefüllte Thonzelle wird häufig mit geschmolzenem Pech verschlossen. Man kann diese Kette auch als Modification der Bunsen'schen auffassen, indem man sich vorstellt, dass der Braunstein (Mangansuperoxyd) die Salpetersäure ersetze. Leclanché's Kette ist lange wirksam und hat eine grössere elektromotorische Kraft als die Daniell'sche. Die Fig. 319 zeigt die äussere Form des Elements. Neuerdings verwendet Leclanché statt des lockeren Gemisches aus Braunstein und Coaks eine aus 40 Thln. Braunstein, 55 Thln. Gaskohle und 5 Thln. Schellack durch sehr starken Druck und mit gleichzeitiger Erwärmung hergestellte feste Masse, welche der Kohlenplatte angepresst wird. Man bekommt diese Elemente in gefülltem Zustande zu kaufen. Ihre Wirkung erklärt sich durch den oxydirenden Effect des Mangansuperoxyds, wodurch der die Polarisation verursachende Wasserstoff unschädlich gemacht wird. Eine unter Umständen ungünstige Eigenschaft dieses Elements ist die Entwickelung von Ammoniakgeruch, die aber nur bei starker Inanspruchnahme lästig wird.

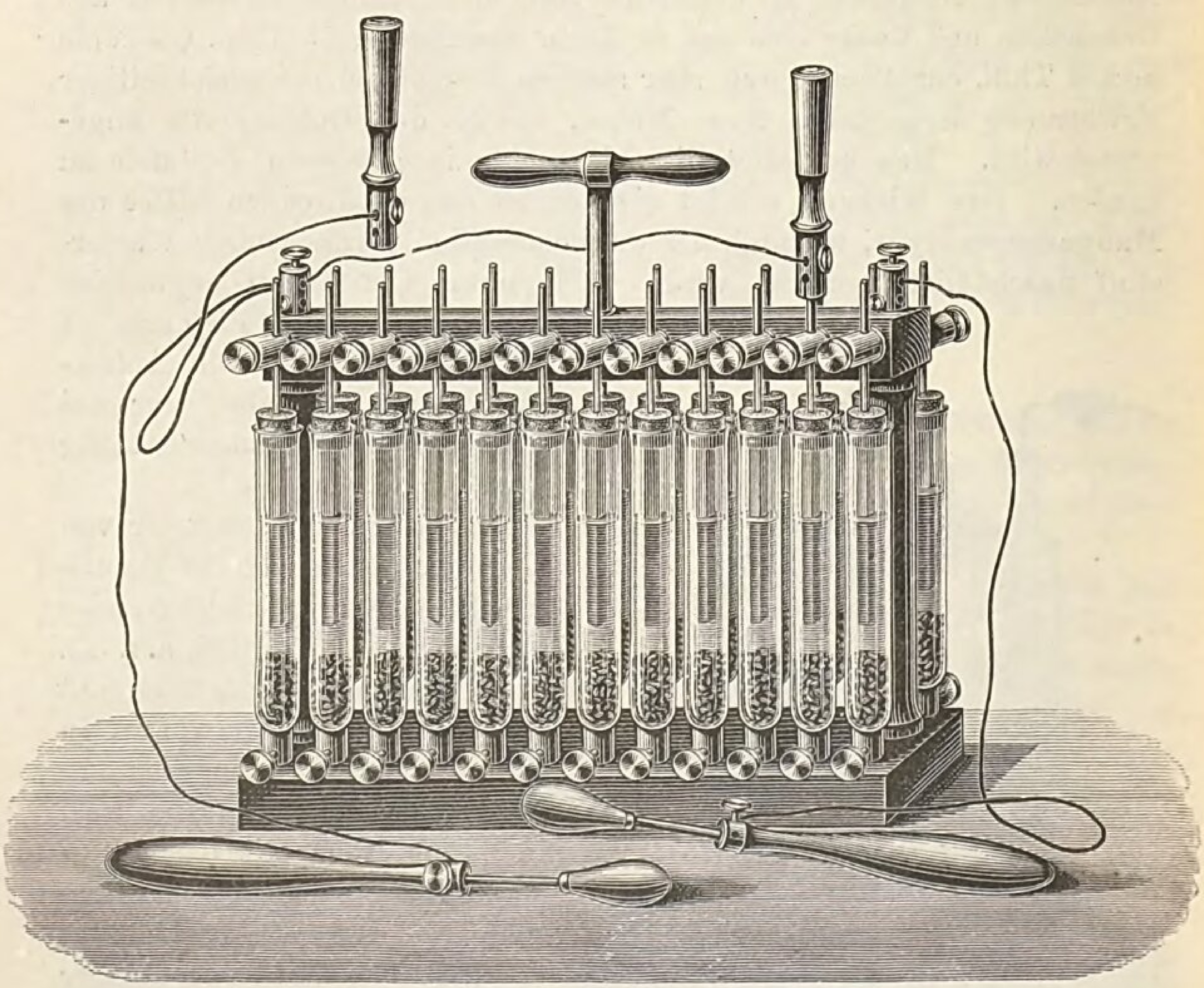
Fig. 319.



v. Beetz hat der Kette von Leclanché eine für therapeutische Zwecke recht zweckmässige Form gegeben (Fig. 320, a. f. S.). Jedes einzelne Element besteht aus einer Reagensglasröhre, in deren Boden ein Platindraht eingeschmolzen ist. Das Glas wird zu $^1/_3$ der Höhe mit einem Gemisch von grob gestossener Gaskohle und Braunstein, dann bis $^2/_3$ der Höhe mit concentrirter Salmiaklösung angefüllt. Durch den Kautschukstopfen reicht ein Zinkstab in die Flüssigkeit, an welchen oben ein Messingdraht angegossen ist; derselbe wird mit dem Platindraht des nächsten Elements verbunden. Das Uebrige ist aus der Abbildung zu ersehen, welche eine Batterie von 24 solchen Elementen sammt den Applicationspolen darstellt. Pincus und fast gleichzeitig Warren de la Rue und Müller haben eine Chlorsilberkette construirt, welche eine analoge Einrichtung wie die Kette von Leclanché besitzt. Ein amalgamirter Zinkstab und ein mit gefälltem

Chlorsilber gefülltes Silberbecherchen befinden sich in einer mit Kochsalzlösung gefüllten Proberöhre, die mittelst eines Korkes, der die Zuleitungsdrähte hindurchlässt, geschlossen ist. Warren de la Rue und Müller haben Chlorsilberbatterien bis zur enormen Anzahl von 11 000 Elementen aufgebaut. Bei denselben war der Zinkstab 15 cm lang, 5,6 mm dick und nicht amalgamirt. Das Chlorsilber war in Form eines 5,4 cm langen, 7,6 mm dicken Stäbchens an einen Silberdraht angeschmolzen und von einem Cylinder aus drei Lagen Pergamentpapier umgeben, um directe Berührung mit dem Zink zu ver-

Fig. 320.



meiden. Die Flüssigkeit besteht aus 23 Thln. Salmiak auf 1000 Thle. Wasser. Die Glasgefässe haben 14 cm Höhe, 3 cm Durchmesser und werden durch einen Paraffinpfropf geschlossen, der den Zinkstab hindurchlässt und den Silberdraht am Rande einklemmt. Die äussere Anordnung der Batterie ist ähnlich wie bei der Batterie von Beetz nach Leclanché. Beim Schluss der Kette wird das Zink zu Chlorzink gelöst und eine äquivalente Menge Chlorsilber zu Silber reducirt. Die elektromotorische Kraft ist ungefähr gleich derjenigen eines Daniell'schen Elementes. Der Vortheil dieser Batterie besteht in ihrer Compendiosität. Die hohen Anschaffungskosten sollen durch die geringen

Erhaltungskosten aufgewogen werden, da man das Silber immer wieder verwenden kann.

Verschiedene Verbindungsweisen Volta'scher Elemente, Klemmen, Stromwähler und Stromwender. 118 Wir werden bald sehen, dass man zu gewissen Stromeffecten einer Säule von vielen Plattenpaaren bedarf, während zu anderen nur wenige Plattenpaare, ja nur ein einziges, aber von möglichst grosser Oberfläche, nöthig ist. Im ersteren Falle wandte man sonst die eigentliche Volta'sche Säule, Fig. 289, S. 360, im letzteren dagegen Hare's Calorimotor,

Fig. 321.

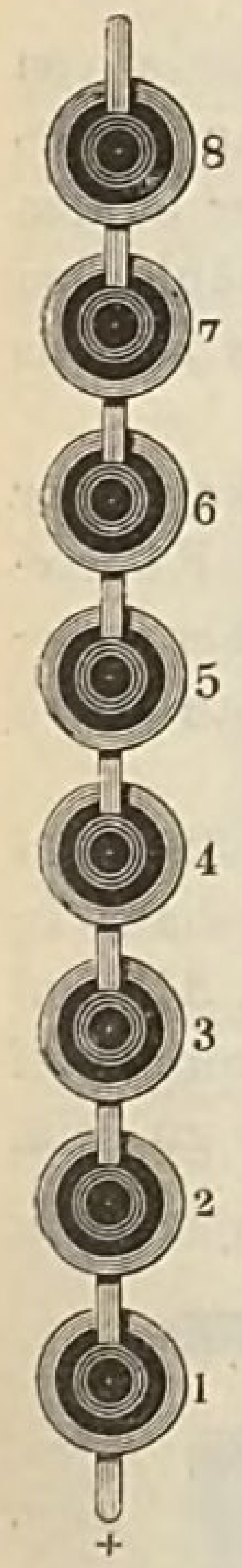


Fig. 322.

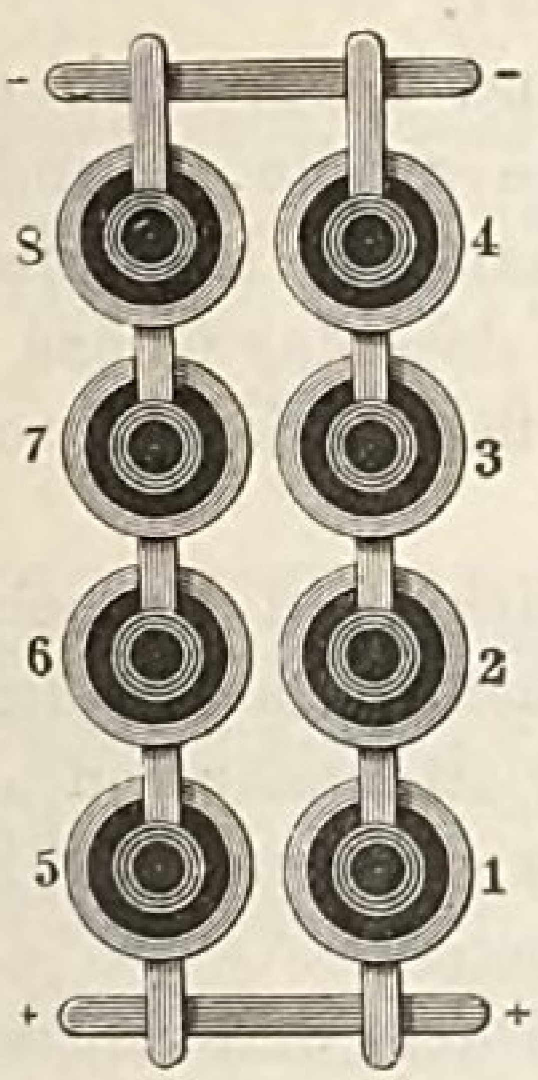


Fig. 323.

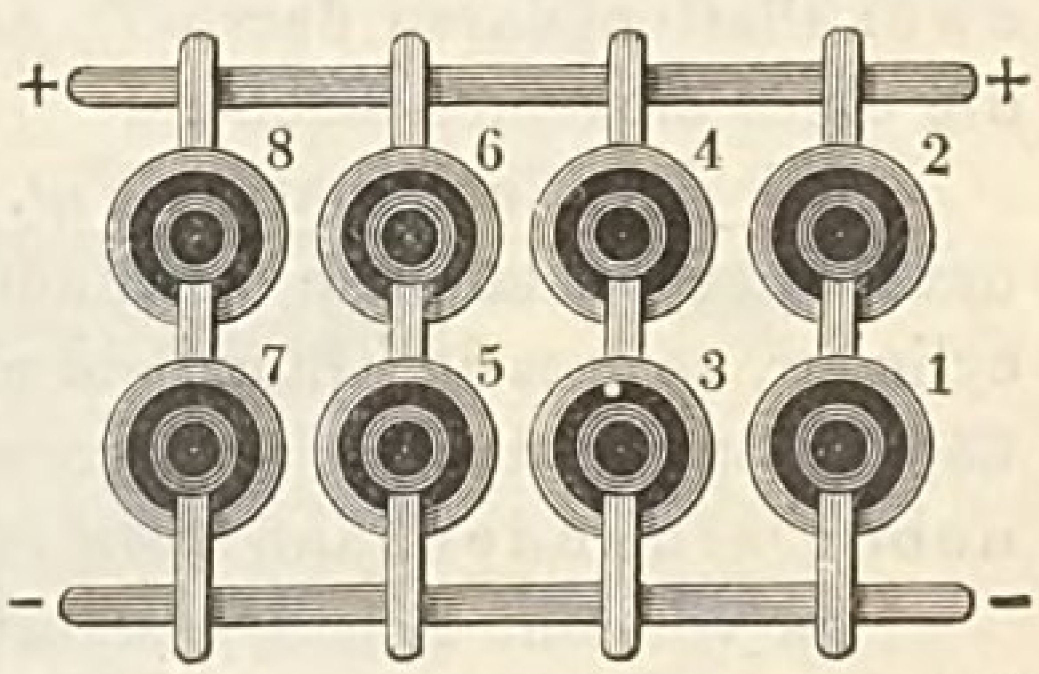


Fig. 324.

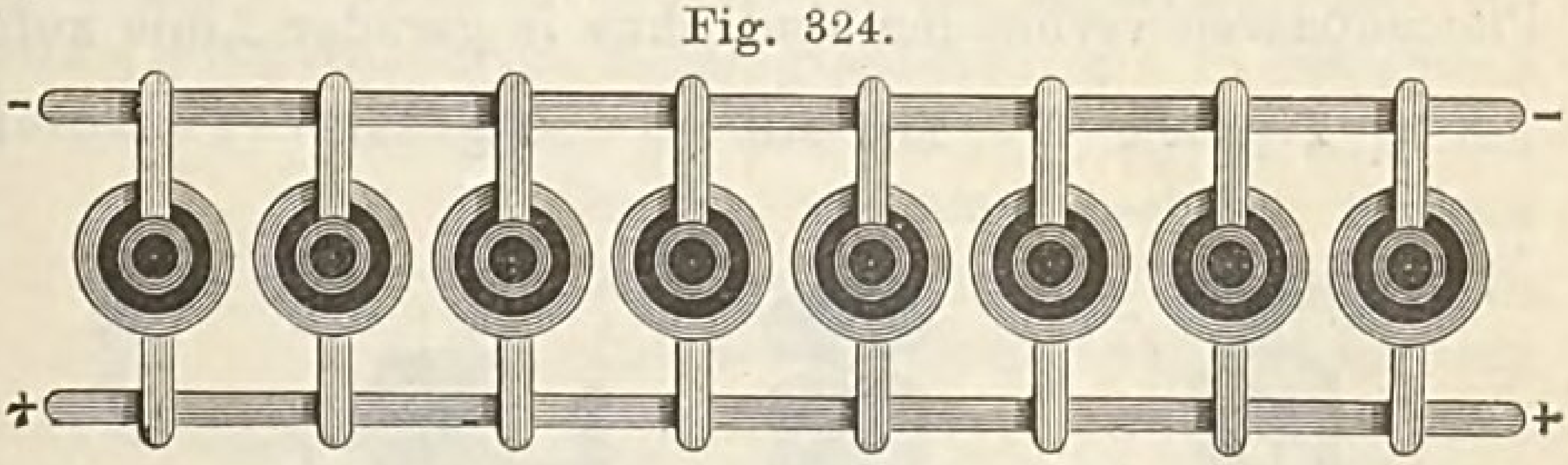


Fig. 301, S. 370, oder ähnliche Apparate an. Wenn man mit constanten Rheomotoren experimentirt, also mit Daniell'schen, Bunsen'schen oder Grove'schen Bechern, so kann man nach Belieben bald eine Säule von vielen Plattenpaaren, bald eine solche von wenigen Plattenpaaren, aber grösserer Oberfläche herstellen, je nachdem man die Becher auf verschiedene Weise combinirt.

Gesetzt, man habe acht Becher zur Disposition, so sind mit denselben vier verschiedene Combinationen möglich; diese vier Combinationen sind in den Fig. 321 bis 324 dargestellt.

Fig. 321 stellt diejenige Combination der acht Becher vor, bei welcher sie eine Säule von acht Plattenpaaren bilden. Man sagt in die-

sem Falle, die Elemente seien *hinter einander* (auf Spannung) verbunden. Wenn die beiden Pole dieser Säule in leitende Verbindung gebracht werden, so muss der Strom die acht Becher der Reihe nach durchlaufen. Bezeichnen wir mit E die Potentialdifferenz an den Polen eines einzelnen Bechers, so ist 8 E die Potentialdifferenz an den Polen der Säule Fig. 321.

Bei der in Fig. 322 dargestellten Combination bilden die vier Becher 1, 2, 3 und 4 eine Säule; die vier Becher 5, 6, 7 und 8 bilden eine zweite Säule; die gleichnamigen Pole dieser beiden Säulen sind in leitende Verbindung gebracht, so dass das Ganze eine Säule von vier Plattenpaaren repräsentirt, deren jedes eine doppelt so grosse Oberfläche hat, als ein Plattenpaar der Säule Fig. 321.

In Fig. 323 bilden die Becher 1 und 2 für sich eine Säule von zwei Plattenpaaren, 3 und 4 bilden eine zweite, 5 und 6 eine dritte, 7 und 8 endlich eine vierte. Die gleichnamigen Pole dieser vier Säulen sind in leitende Verbindung gebracht, so dass das Ganze eine Säule von *zwei* Plattenpaaren darstellt, deren Oberfläche viermal so gross ist, als die eines einzelnen Bechers.

Bei der Combination Fig. 324 endlich sind die acht Zinkcylinder unter sich in leitende Verbindung gebracht, ebenso die acht Kupfercylinder, so dass das Ganze ein einfaches Plattenpaar von achtfacher Oberfläche repräsentirt. In diesem Falle sagt man, die Elemente seien *neben einander* (auf Quantität) verbunden.

Es versteht sich von selbst, dass bei der Combination Fig. 321 und bei der Combination Fig. 324 die einzelnen Becher nicht durchaus in gerader Linie aufgestellt sein müssen. So stellt ja z. B. Fig. 313 auf S. 381 zwölf *Bunsen*'sche Becher dar, welche zu einer Säule von zwölf Plattenpaaren verbunden sind, ohne in gerader Linie aufgestellt zu sein.

Fig. 325.

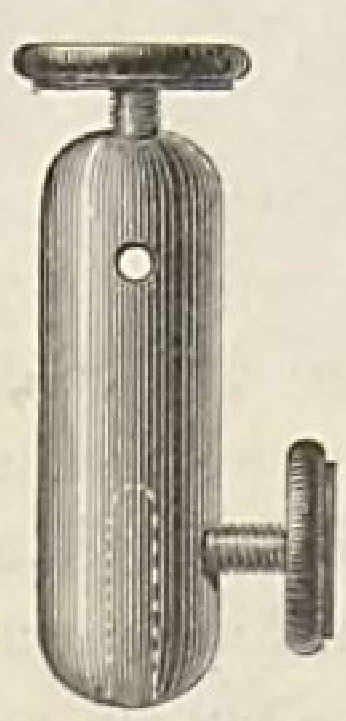


Fig. 326.

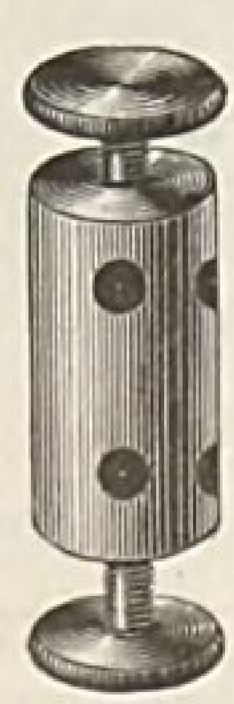


Fig. 327.

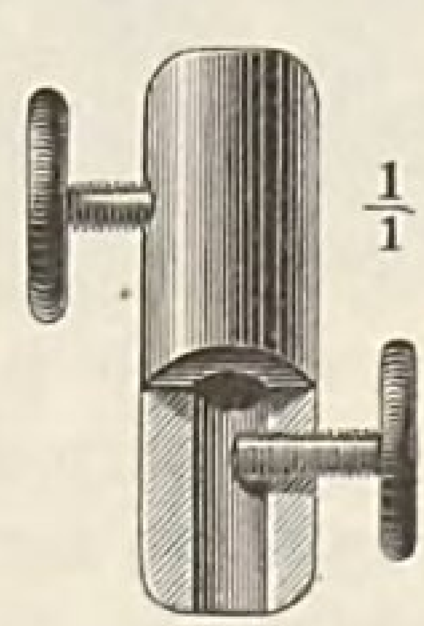
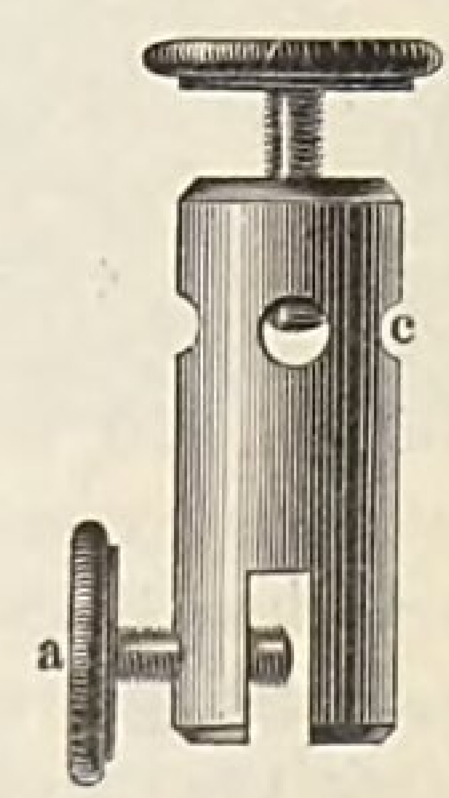


Fig. 328.

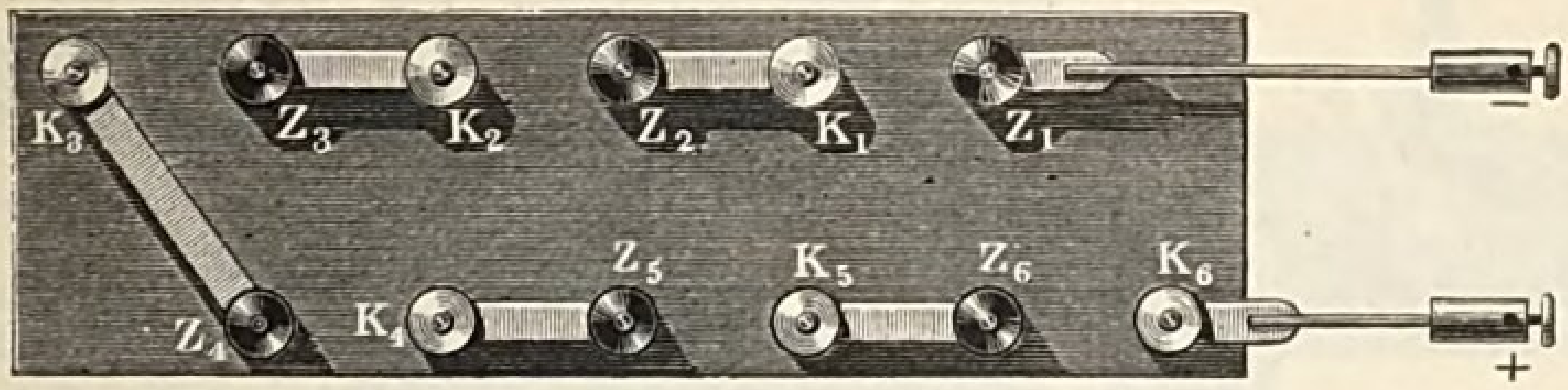


Um die Drahtenden oder Blechstreifen der einzelnen Elemente mit einander zu verbinden, bedient man sich entweder der *Quecksilbernäpfe*, in welche man die Enden eintaucht, oder bequemer der von *Poggendorff* eingeführten *Klemmschrauben*, von welchen die Figuren 325, 326, 327 und 328 eine Abbildung geben, die keiner weiteren Erläuterung bedarf. Vor dem Zusammenschrauben müssen die Drähte stets

blank gescheuert werden. Die sicherste Verbindung erhält man aber stets durch Eintauchen der amalgamirten Drahtenden in Quecksilbernäpfe.

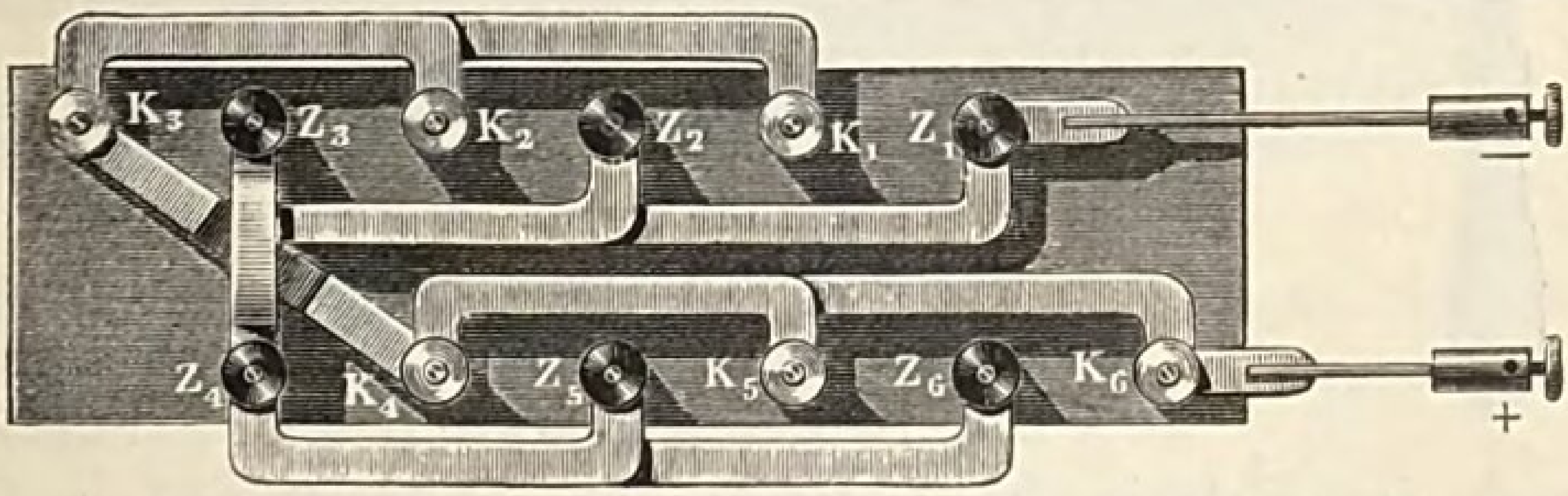
Um die sechs Becher seiner grossen Zinkkohlenbatterie auf verschiedene Weise combiniren zu können, hat Stöhrer an derselben eine

Fig. 329.



Vorrichtung angebracht, welche er als Pachytrop bezeichnet, wofür man auf deutsch „Stromschalter" sagen kann. Auf einem Brett von Eichenholz, Fig. 329 und Fig. 330, sind an jeder Längsseite sechs Messingsäulchen von der in Fig. 331 dargestellten Einrichtung ein-

Fig. 330.



geschraubt. Auf jeder Seite des Brettes stehen drei Zinkkohlenbecher. Von jedem Kohlencylinder sowohl wie von jedem Zinkstab führt ein Kupferdraht zu dem entsprechenden Messingsäulchen, um in demselben mittelst der Schraube t festgeklemmt zu werden. So ist das Zink des ersten, zweiten ... sechsten Bechers mit den Messingsäulchen $Z_1, Z_2 \ldots Z_6$ in leitender Verbindung; die Kohlencylinder des ersten, zweiten ... sechsten Bechers dagegen sind mit den Messingsäulchen K_1, K_2 ... K_6 verbunden.

Fig. 331.

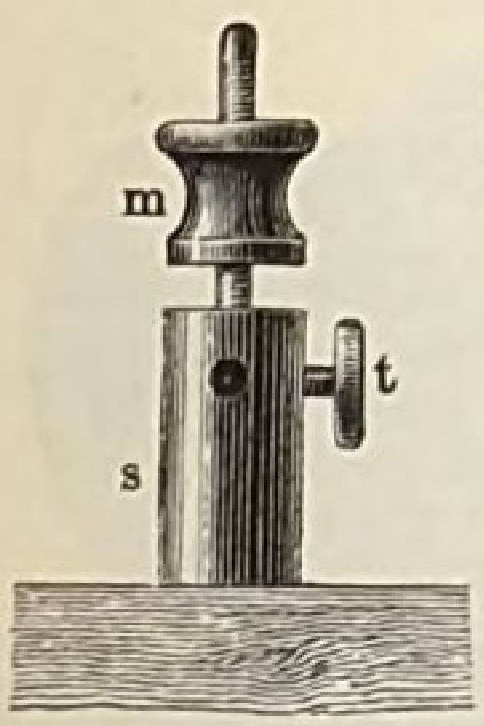


Fig. 332.

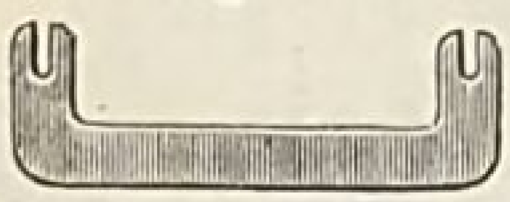


Fig. 333.

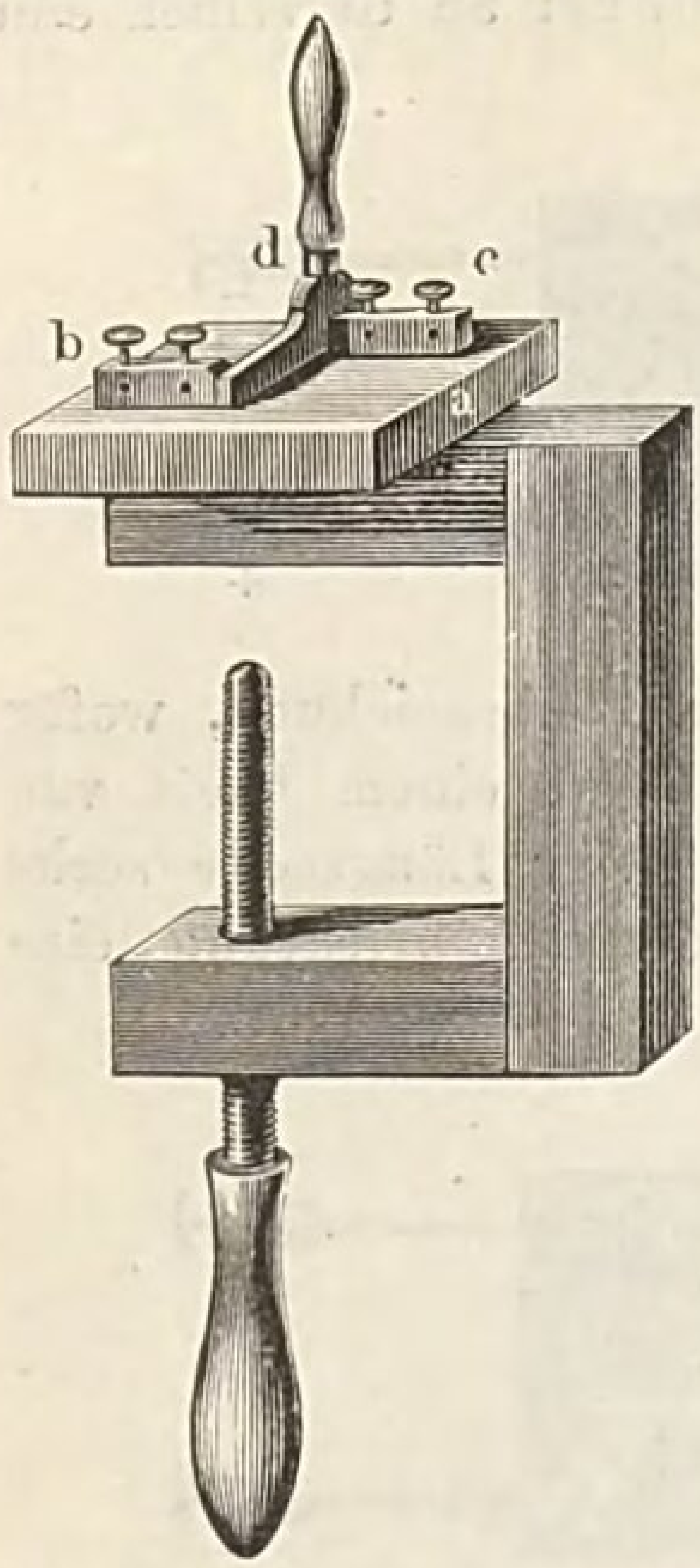


Um nun die Messingsäulchen in verschiedener Weise mit einander verbinden zu können, dienen Streifen von Kupferblech von der Form Fig. 332 oder Fig. 333, welche zwischen das Säulchen s und die Schraubenmutter m, Fig. 331, eingeklemmt werden.

Bei der Verbindung Fig. 329 sind die Becher so verbunden, dass sie eine Säule von sechs Elementen bilden, bei der Combination Fig. 330 sind dagegen alle sechs Becher zu einem einzigen Plattenpaare verbunden. Durch entsprechende Abänderung der Verbindung kann man

auch leicht eine Säule von zwei dreifachen oder eine solche von drei Doppelbechern herstellen.

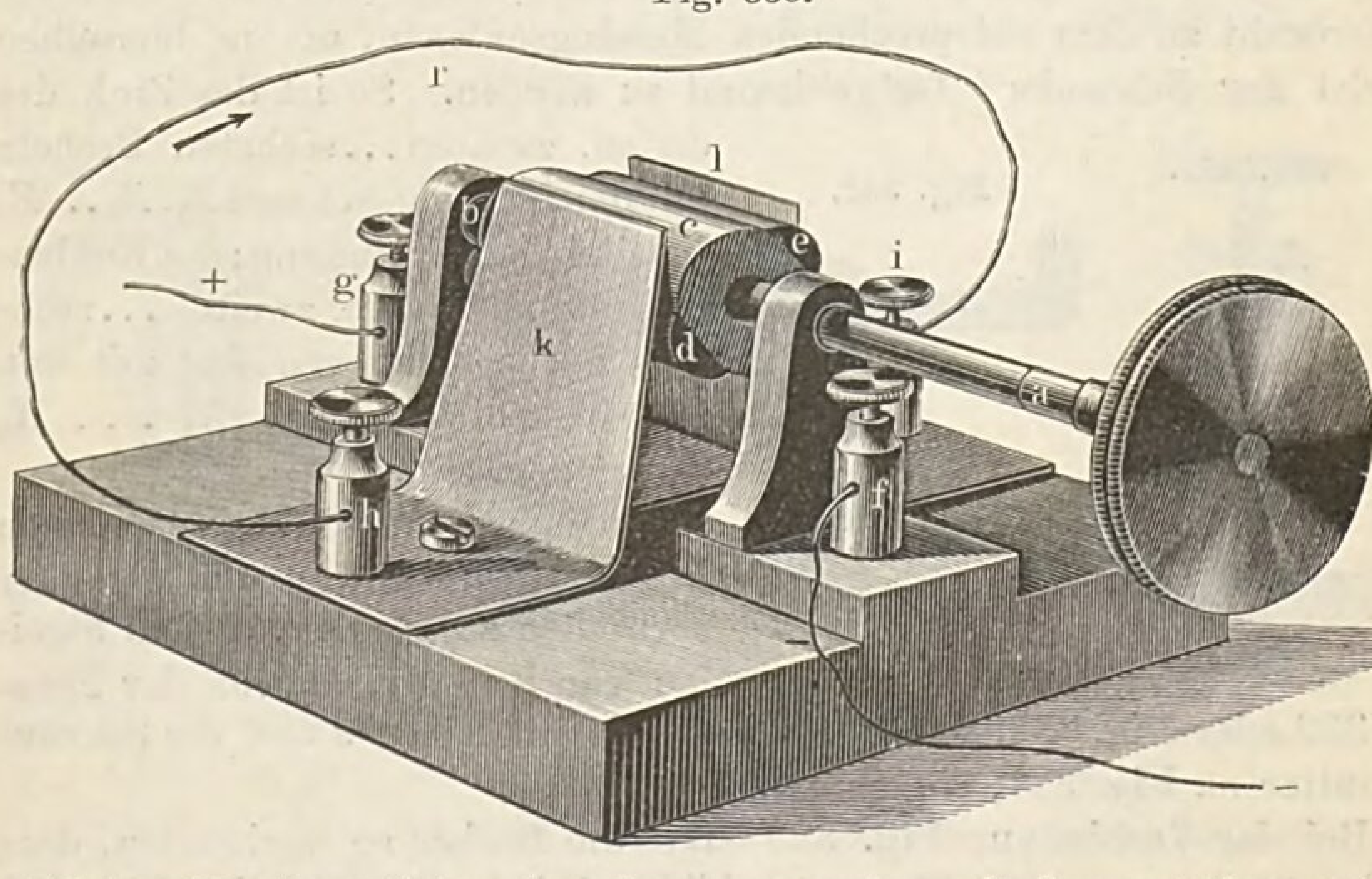
Fig. 334.



Es giebt noch andere Formen des Pachytrops. Eine sehr zweckmässige und übersichtliche Vorrichtung zu beliebiger Combination constanter Elemente hat Bothe im CIX. Bd. von Poggendorff's Annalen beschrieben.

Zum Oeffnen und Schliessen eines Stromes, sowie zur Einschaltung einer Nebenschliessung ist der sogenannte Schlüssel von du Bois Reymond sehr bequem (Fig. 334). Das Hartgummibrettchen *a* wird mittelst Schraubenzwinge am Tischrande befestigt, die zu verbindenden Leitungen werden bei *b* und *c* eingeklemmt. Wird dann der Hebel *d* in die gezeichnete Lage gebracht, so schliesst er den Strom, legt man ihn zurück, so unterbricht er denselben. Endlich sind noch zahlreiche Apparate im Gebrauche, durch welche die Richtung des Stromes in einer Leitung rasch umgekehrt werden kann. Dieselben heissen Stromwender (Commutatoren, Gyrotrope oder Inversoren). Einer der einfachsten derselben ist der Ruhmkorff'sche Stromwender, der nach dem Princip des Vierweghahns construirt und in Fig. 335 abgebildet ist. *c* ist ein Elfenbeincylinder mit zwei aufgesetzten ver-

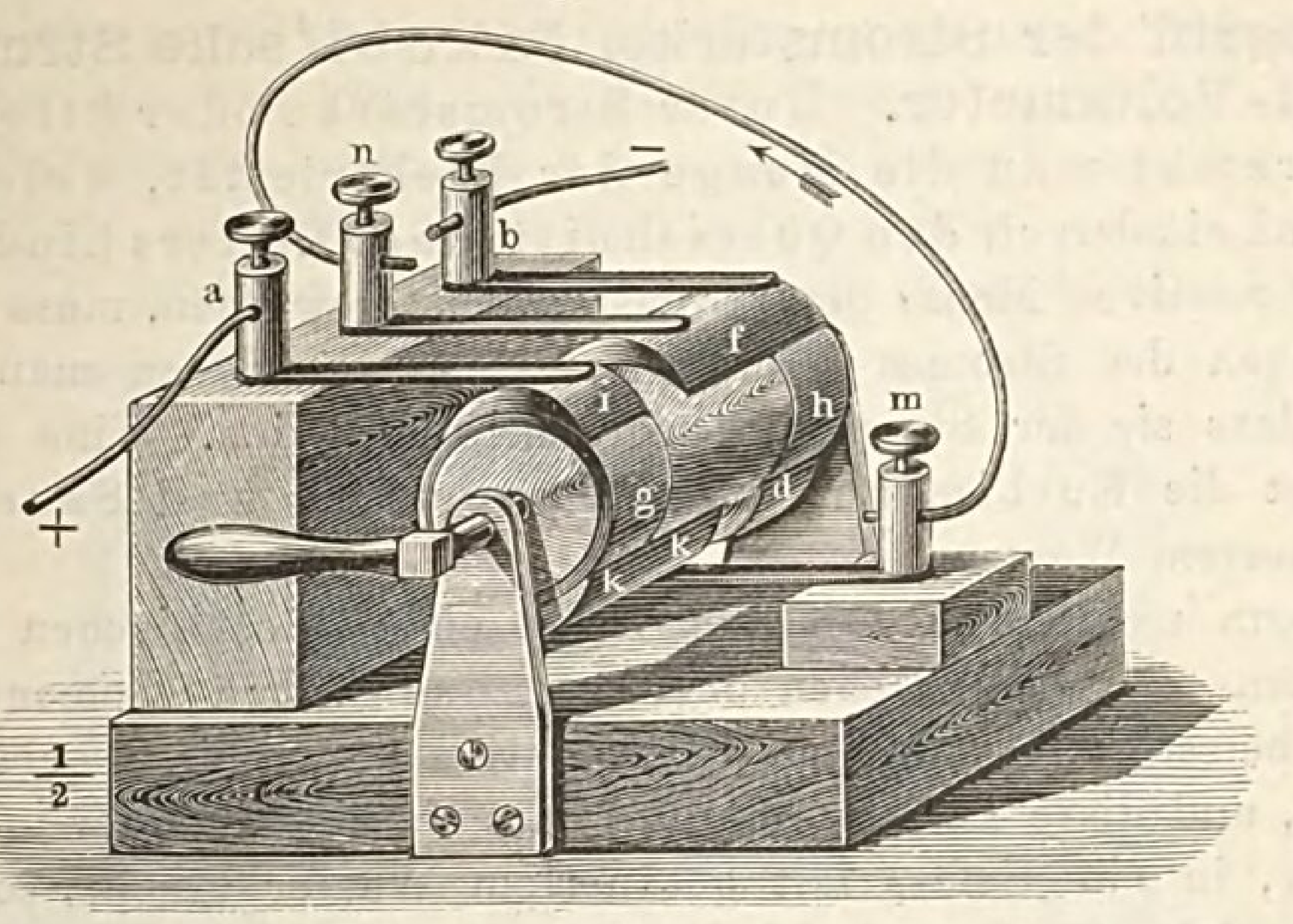
Fig. 335.



goldeten Messingwülsten *d* und *e*, wovon eine mit der metallenen Axe *a* und durch diese mit der Klemmschraube *f* in Verbindung steht, während

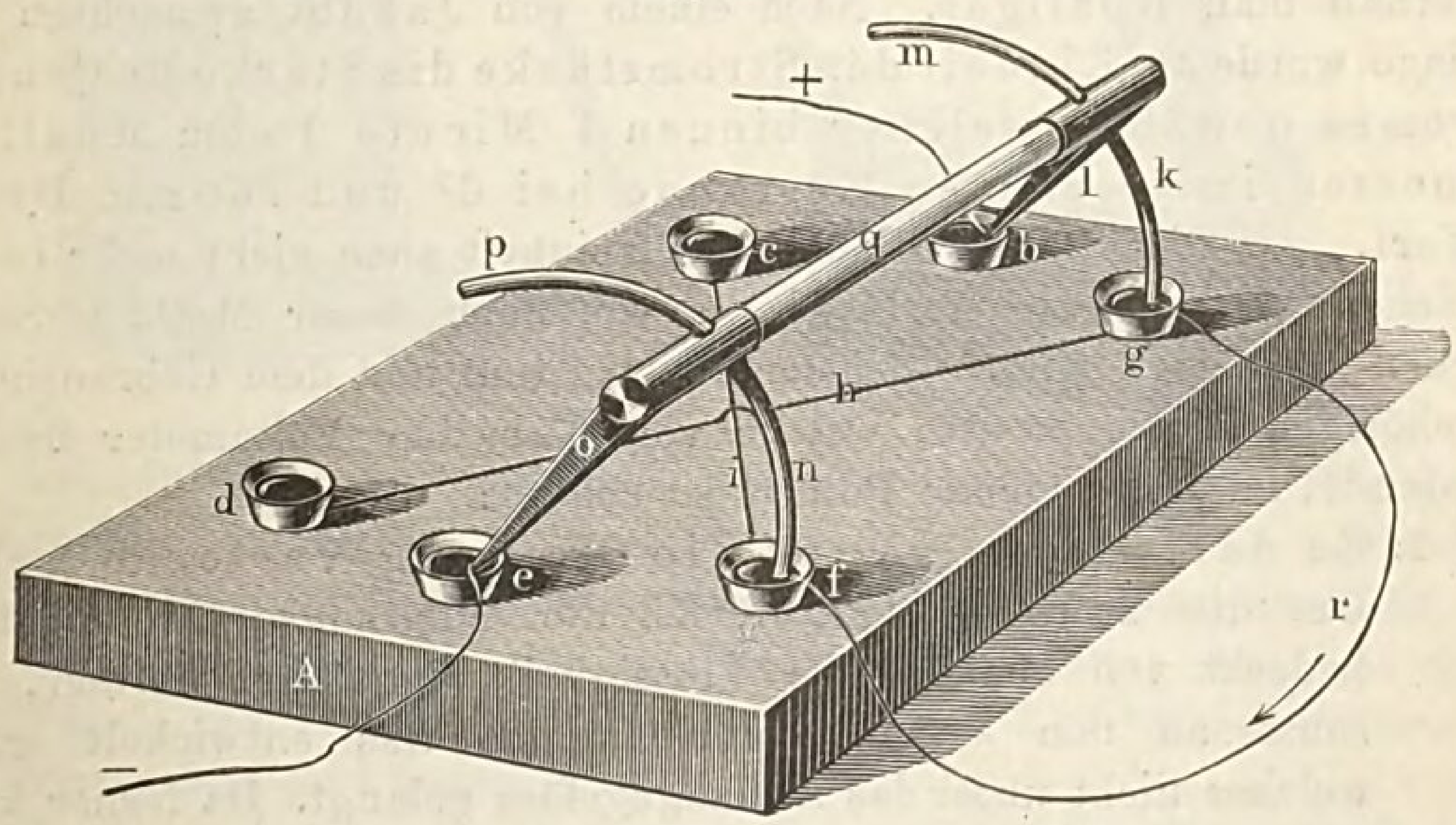
die andere Wulst *c* mit dem hinteren Axenstück *b* und der Klemme *g* verbunden ist. Die Axenstücke *a* und *b* sind von einander isolirt. An die beiden Wülste legen sich die federnden Blechstücke *k* und *l* mit Reibung an und setzen jene mit den Klemmen *h* und *i* in leitende Verbindung. Man klemmt die Poldrähte der Batterie bei *g* und *f* ein.

Fig. 336.



Je nach der Stellung der Wülste geht dann der Strom durch *r* von *h* nach *i* oder umgekehrt. Um den Strom umzukehren, braucht man also

Fig. 337.



nur die Axe um 180⁰ zu drehen. Dreht man um 90⁰, so unterbricht man den Strom ganz. Aehnlich wirkt der Stromwender, welcher in Fig. 336 abgebildet und wohl ohne Weiteres verständlich ist. Ein mit Quecksilbercontact wirksamer Stromwender ist unter anderen der von Pohl construirte, Fig. 337. Die Quecksilbernäpfe *d*, *g*, *f* und *c* sind über Kreuz durch von einander isolirte Drähte ein- für allemal verbunden.

Zwei dreiarmige Metallbügel *pon* und *mlk* sind durch den Glasstab *q* mechanisch verbunden. Die Arme *o* und *l* tauchen in zwei weitere Quecksilbernäpfe *e* und *b*, die mit den Poldrähten der Batterie in Verbindung stehen. Je nachdem man die Bügel nach rechts oder links kippt, geht dann der Strom im Drahte *r* von *g* nach *f* oder umgekehrt.

119 **Begriff der Stromstärke, Jakobi'sche Stromeinheit, Volum-Voltameter.** Unter Stromstärke oder Stromintensität versteht man die Menge der Elektricität, welche in der Zeiteinheit durch den Querschnitt eines Leiters hindurchgeht. Um ein relatives Maass der Stromstärke zu gewinnen, muss man solche Wirkungen des Stromes ins Auge fassen, von denen man annehmen kann, dass sie der Stromstärke proportional seien. Eine solche Wirkung ist die Entbindung von Wasserstoff und Sauerstoff aus angesäuertem Wasser.

Wenn man an den beiden Polen einer Volta'schen Säule von mindestens 3 Daniell'schen oder 2 Bunsen'schen Elementen Kupferdrähte befestigt, welche mit Platinplatten von 1 bis 4 qcm Oberfläche endigen, und diese Polplatten, ohne dass sie mit einander in Berührung kommen, in ein Gefäss mit gesäuertem Wasser taucht, so findet alsbald eine lebhafte Gasentwickelung an den Platinplatten statt. An der einen steigt Sauerstoffgas, an der anderen steigt Wasserstoffgas in die Höhe.

Sammelt man beide Gase in einem gemeinschaftlichen Recipienten, so erhält man Knallgas. Nach einem von Jakobi gemachten Vorschlage wurde als Einheit der Stromstärke die Stärke desjenigen Stromes gewählt, welcher binnen 1 Minute 1 ccm Knallgas, gemessen im trockenen Zustande bei 0° und 760 mm Druck, liefert. Ist diese Jakobi'sche Stromeinheit auch nicht mehr im Gebrauche, so muss man doch wissen, wie nach dieser Methode Stromstärken zu messen sind. Bei der Construction und dem Gebrauche der zugehörigen Messapparate, welche von Faraday Voltameter benannt wurden*), ist auf folgende Punkte zu achten:

1. Es darf kein Gas für die Messung verloren gehen. Um dies zu vermeiden, dürfen die Zuleitungsdrähte nicht unbedeckt von oben in die Flüssigkeit eingeführt werden, weil sonst an den ersten Eintrittsstellen Gas entwickelt würde, welches nicht unter das Auffangegefäss gelangt. Da ferner kaltes Wasser einen Theil der Gase absorbiren würde, so muss dasselbe entweder erwärmt, oder besser vor dem Hauptversuche mit den

*) Da Volta an der Erfindung dieser Apparate nicht betheiligt ist, und neuerdings unter dem ähnlichen Namen Voltmeter Apparate zur Messung von Potentialdifferenzen verstanden werden, so würden die Voltameter besser als „chemische Rheometer" zu bezeichnen sein.

Gasen gesättigt werden. Da endlich bei schwächeren Strömen ein Theil des Sauerstoffs in Ozon verwandelt und deshalb das Volum verkleinert wird, so empfiehlt es sich in diesem Falle, nur das Wasserstoffgas aufzufangen und dann das Anderthalbfache des Volums desselben als das Volum des Knallgases anzunehmen.

2. *Es muss der Druck bestimmbar sein*, unter dem das Gas bei der Messung steht. Zu diesem Zwecke muss der Apparat die Einrichtung haben, dass man die Höhendifferenz der Sperrflüssigkeit entweder gleich Null machen oder messen kann; es muss im letzteren Falle das specifische Gewicht der letzteren

Fig. 338.

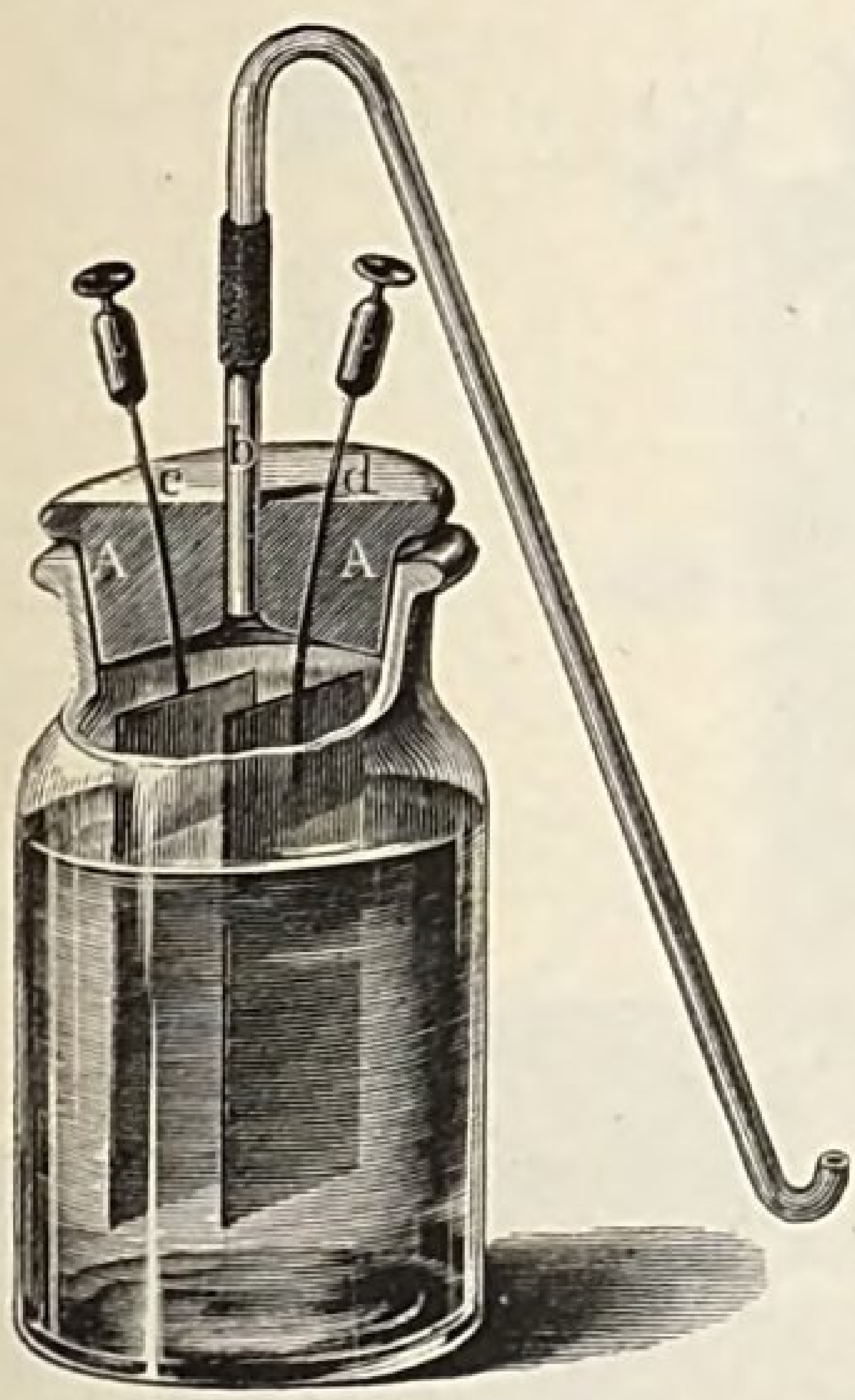
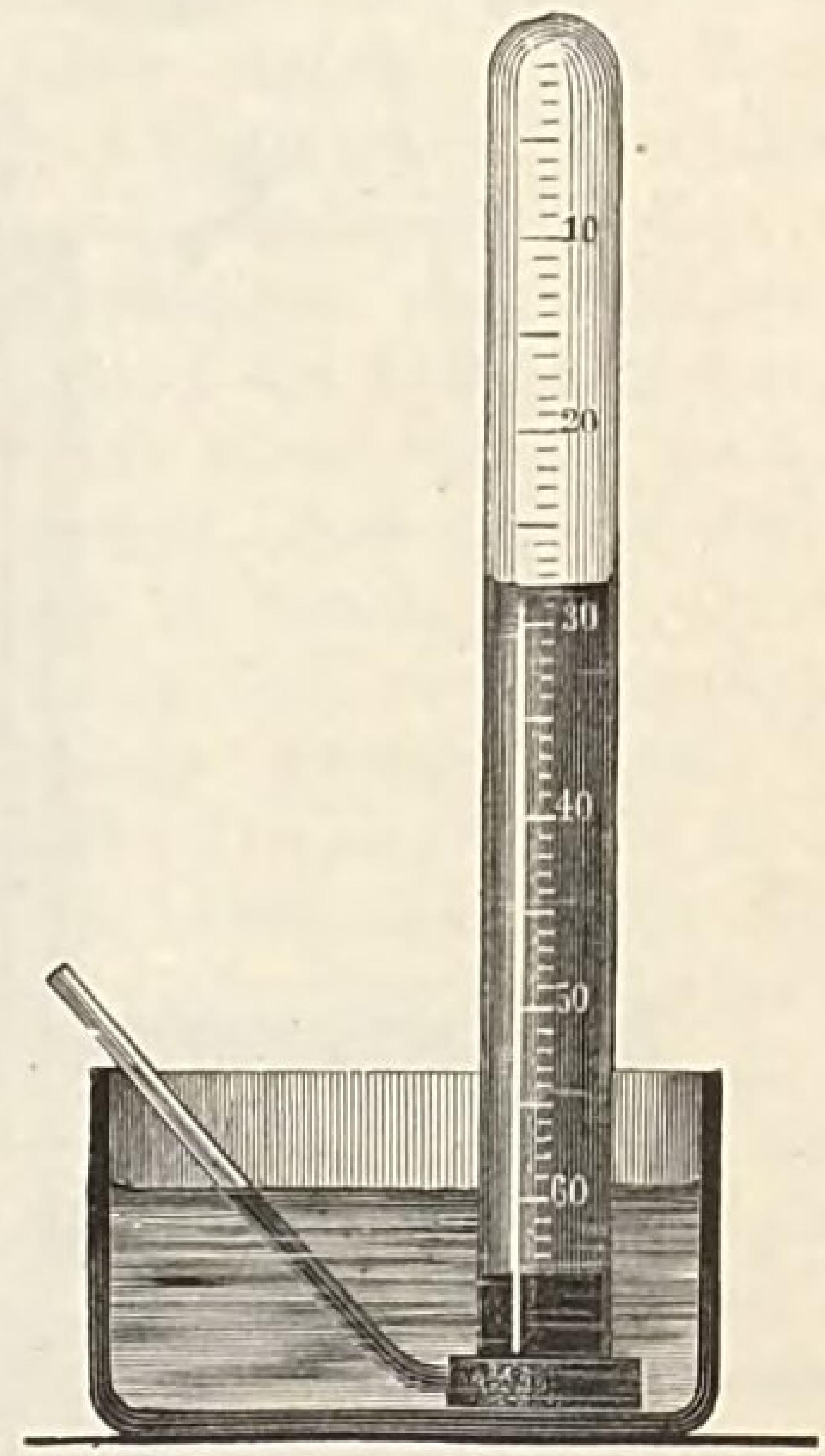


Fig. 339.



bekannt sein, um den Druck derselben auf Quecksilberhöhe umrechnen zu können; es muss gleichzeitig ein Barometer beobachtet werden und es muss endlich der Druck der Wasserdämpfe in dem Gasraume über der Sperrflüssigkeit bekannt sein, um das Volum des feuchten Knallgases auf das des trockenen Gases umrechnen zu können.

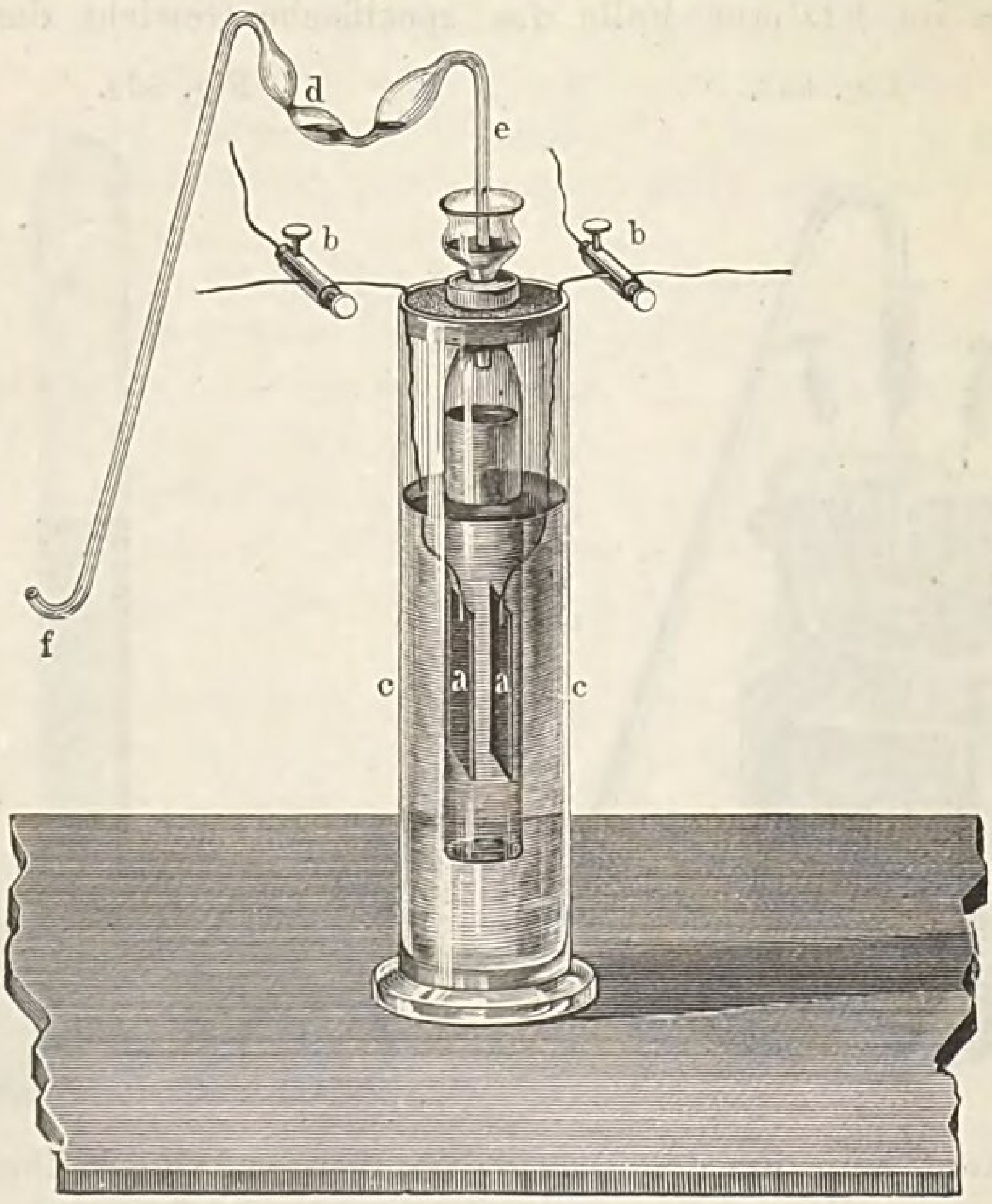
3. Endlich muss die gemeinsame Temperatur des Gases und der Sperrflüssigkeit gemessen werden, da von ihr das Volum des Gases theils direct, theils indirect beeinflusst wird; letzteres, weil die Tension des Wasserdampfes und das specifische Gewicht der Sperrflüssigkeit davon abhängt.

Bei minder genauen Versuchen verwendet man als Entwickelungs- und Maassgefässe die in den Figuren 338 u. 339 abgebildeten Apparate.

Das Glasgefäss Fig. 338 wird mit der verdünnten Säure gefüllt. Durch den Stöpsel aus Kork oder Glas, welcher das Gefäss schliesst, gehen zwei Kupferdrähte luftdicht hindurch, an welchen unten zwei Platinplatten angelöthet sind, die sich im Wasser in einiger Entfernung gegenüberstehen. Der Theil der Kupferdrähte, welcher sich innerhalb des Gefässes befindet, sowie die Löthstellen, müssen durch einen Siegellacküberzug vor der Berührung mit der sauren Flüssigkeit geschützt sein.

Bringt man die aus dem Stöpsel hervorragenden Enden der Kupferdrähte durch Zuleitungsdrähte mit den Polen der Säule in Verbindung,

Fig. 340.



so geht der Strom durch das Wasser, die gebildeten Gase steigen auf und entweichen durch das gekrümmte Rohr.

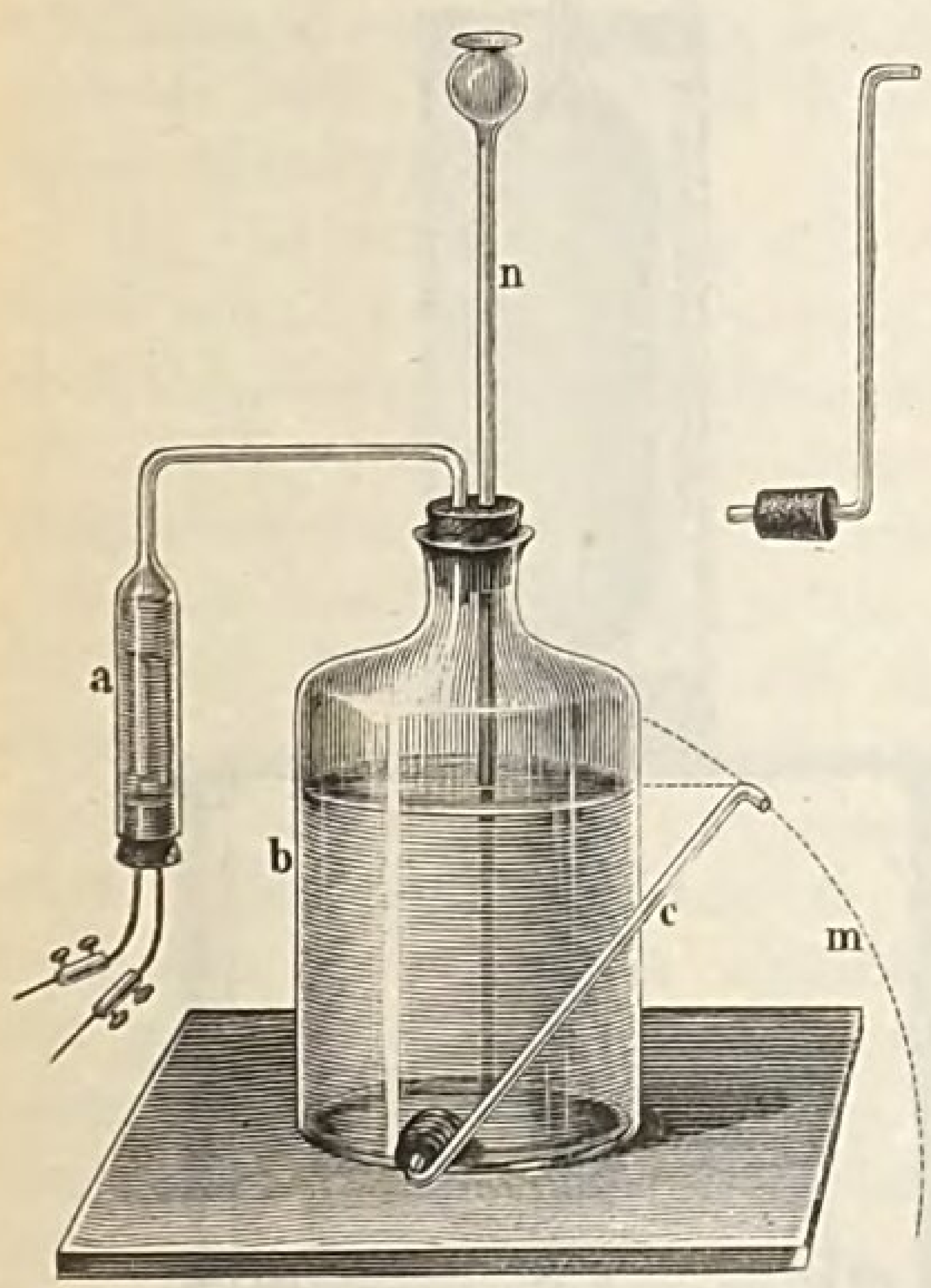
Um die Gase aufzufangen, welche durch das gekrümmte Rohr entweichen, muss man das untere Ende desselben in ein Gefäss mit Wasser tauchen, und dann über die Mündung des gekrümmten Rohres eine mit Wasser gefüllte graduirte Röhre bringen. Die entweichenden Gase steigen als Blasen in den oberen Theil des Rohres, und das Volumen des in einer gegebenen Zeit hier gesammelten Gases kann leicht an der Theilung der Röhre abgelesen werden.

Um die graduirte Röhre festzuhalten, kann man sich der in Fig. 339 dargestellten Vorrichtung bedienen. Auf den Boden des Gefässes ist ein

Kork aufgekittet, welcher mit einem Einschnitt zur Aufnahme des Rohres versehen ist, durch welches das Gas ausströmt.

Will man das Knallgas trocken über Quecksilber auffangen, so kann man sich des von Bunsen construirten Zersetzungsapparates Fig. 340 bedienen. Das unten geschlossene Glasgefäss, in welchem sich die Platinplatten *a* befinden, ist in ein weiteres, etwa mit Weingeist gefülltes Gefäss *c* eingesetzt, dessen Zweck darin besteht, eine allzu starke Erhitzung der Zersetzungflüssigkeit und der Zuleitungsdrähte zu verhindern. Die aus Platindraht gebildeten Zuleitungsdrähte der Platinplatten *a* sind in der Wand des Zersetzungsgefässes eingeschmolzen. In den oben sich wieder trichterförmig erweiternden Hals des Zersetzungsgefässes ist das Glasrohr *e* eingeschliffen, zum besseren Schluss aber ist etwas Quecksilber in den Trichter gegossen. Bei *d* sind in dem Ableitungsrohr drei Erweiterungen angebracht, welche etwas Schwefelsäure zum Waschen und Trocknen des Gases enthalten.

Fig. 341. Fig. 342.



Alle diese Apparate haben den Nachtheil, dass das vor dem Versuche im Zersetzungsapparate vorhandene Gas, sowie das nach dem Versuche zurückbleibende genau dieselbe Temperatur und denselben Druck haben muss, wenn die Messung nicht fehlerhaft werden soll.

Für stärkere Ströme ist, wenn nicht grosse Genauigkeit verlangt wird, der in Fig. 341 u. 342 abgebildete, von Mohr angegebene Apparat anwendbar. *a* ist die Zersetzungszelle, in welche der Strom durch zwei Platinplatten geleitet wird. Die Flüssigkeit ist verdünnte Schwefelsäure. Das entwickelte Gas wird in die Flasche *b* geleitet, die mit Wasser, Chlorcalciumlösung oder Quecksilber gefüllt sein kann. Die nach zwei Seiten in einem rechten Winkel gebogene Glasröhre *c*, Fig. 342, dreht sich in einem Korke, der dicht in einem Tubulus am Boden der Flasche befestigt ist, mit Reibung um, so dass sie in jeder Lage stehen bleiben kann. Der Ausguss dieser Röhre läuft in dem punktirten Kreise *m*, und kann dadurch jede beliebige Höhe annehmen. Wenn dieser Ausguss auf gleicher Höhe mit dem Niveau der Flüssigkeit in der Flasche steht, so ist die Flasche zum Versuche bereit. Die senkrechte Röhre *n* dient zum Erkennen, ob die Spannung der äusseren und inneren Luft gleich ist; in diesem Falle nämlich steht das Niveau der Flüssigkeit innerhalb dieser Röhre genau in der Ebene des Flüssigkeitsspiegels.

Man schliesst die Kette und bemerkt den Stand der Uhr in diesem Momente. Hat die Zersetzung eine bestimmte Zeit lang fortgedauert, so unterbricht man den Strom, bringt durch Beugen der Röhre *c* noch so viel Wasser zum Ausfliessen, dass die Spannung der Luft innen und aussen wieder gleich ist, und bestimmt dann die Menge des ausgeflossenen Wassers nach Volumen oder Gewicht. Die Berücksichtigung der Temperatur hat hier einige Schwierigkeit.

Fig. 343.

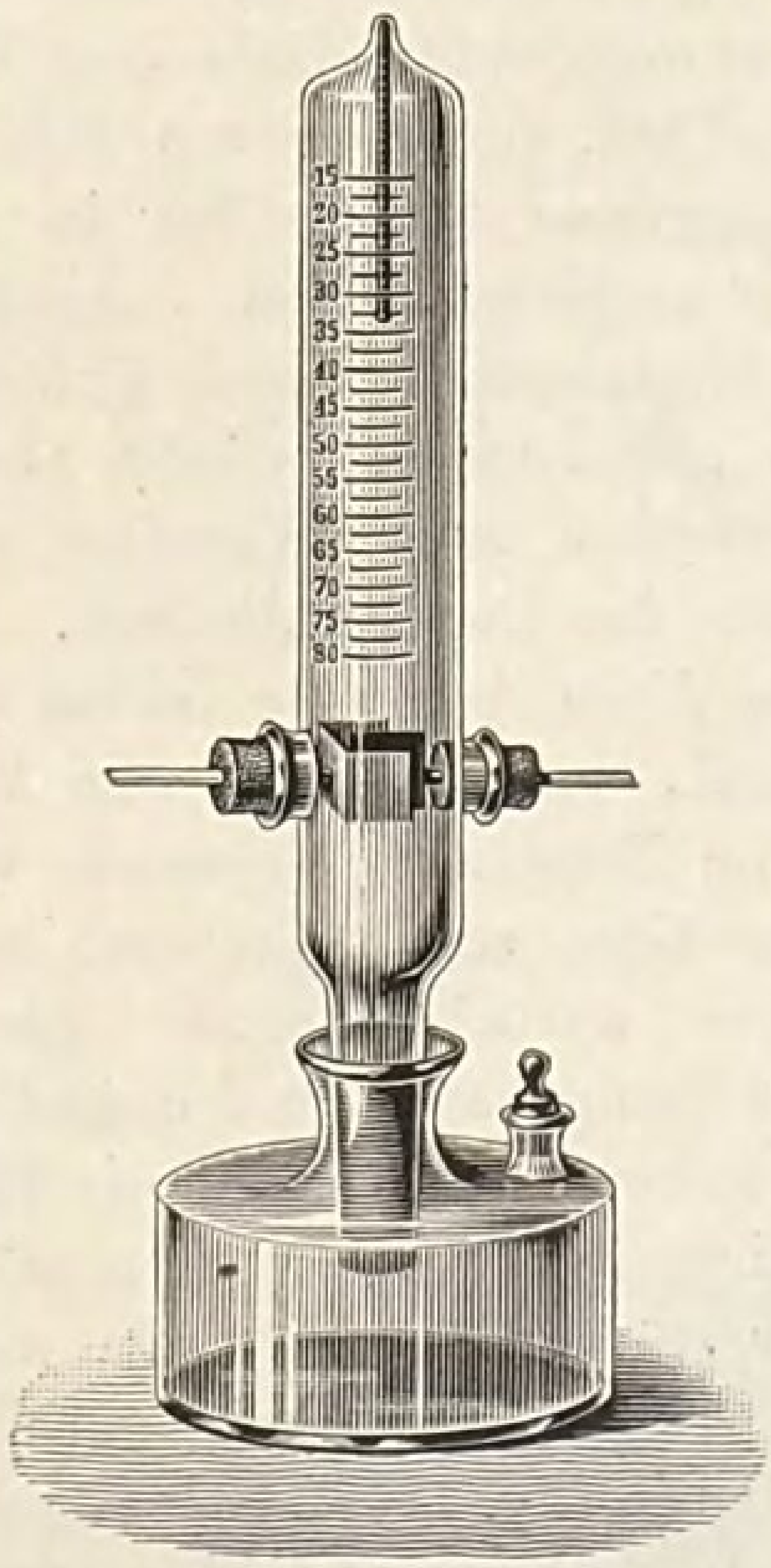
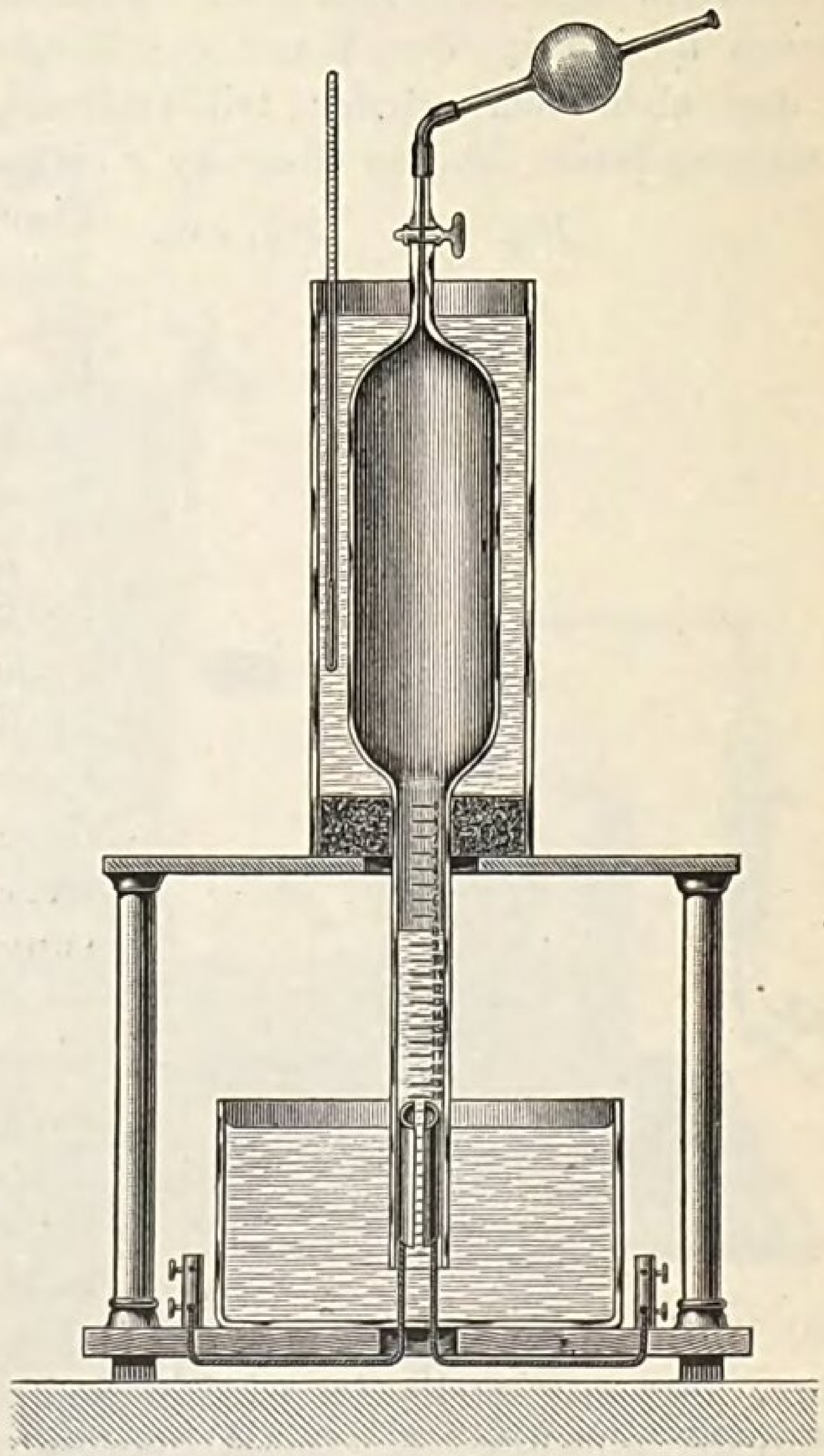


Fig. 344.



Genauere Resultate erhält man mittelst der in Fig. 343 abgebildeten, von F. Kohlrausch angegebenen Form des Voltameters. Dasselbe enthält ein Thermometer im Inneren der Messröhre und braucht nur umgelegt zu werden, um sich neu zu füllen. Der Verfasser bediente sich mit Vortheil eines Voltameters nach Fig. 344. Das Messgefäss hat die Form ähnlich einer Pipette, ist im mittleren Theil weit, unten in eine engere möglichst cylindrische Röhre übergehend, oben mit Capillarrohr und Glashahn versehen, an welchen auch mittelst Kautschukrohr eine Saugpipette angesetzt werden kann. Das Messgefäss wird von einem cylindrischen Behälter umgeben, welcher mittelst eines gefirnissten Korkes wasserdicht aufgeschoben ist. Derselbe ruht auf einer von Säulen getragenen horizontalen, in der Mitte durchbohrten Metallscheibe.

Der engere cylindrische Theil des Messgefässes ist mit einer absteigenden, auf das Glas geätzten Millimetertheilung versehen, welche nicht allein zur Messung des Höhenunterschiedes der Sperrflüssigkeit, sondern mit Hülfe einer Calibrirung auch zur Ablesung des Gasvolums dient. Diese Calibrirung wird am genauesten durchgeführt, indem man das herausgenommene Messgefäss unten mittelst eines Korkes, in den eine kurze enge Glasröhre eingesetzt ist, verschliesst, hierauf durch Saugen Wasser einfüllt, bis dasselbe an den Hahn reicht und nun dasselbe in ein gewogenes Gefäss ausfliessen lässt, bis das Niveau an einen der oberen Millimeterstriche reicht. Durch Wägung des ausgeflossenen Wassers erhält man das Volum bis zu dem betreffenden Theilstrich. Dasselbe wiederholt man für andere Theilstriche und berechnet sich durch Interpolation eine Tabelle, welche direct aus den Ablesungen das Volum ergiebt. Die Stromdrähte führen, mit Guttapercha gut isolirt, von den Klemmen zu den halbcylindrisch gebogenen Platinelektroden, die man entweder beide, oder nur die Wasserstoff entwickelende, mit dem Messgefässe überstülpt.

Bei der Strommessung füllt man das untere Gefäss bis nahe zum Rande mit 20procentiger Schwefelsäure, deren Dichte = 1,14 ist, öffnet den Hahn, saugt die Flüssigkeit bis nahe zum Eintritt in die Capillarröhre, schliesst den Hahn und lässt vorläufig kurze Zeit den Strom hindurchgehen, um die Flüssigkeit mit dem Gase zu sättigen. Man erhält zu diesem Zwecke das Messgefäss durch zeitweises Nachsaugen nahezu voll. Nach Unterbrechung des Stromes lässt man alle Gasblasen sich sammeln, saugt die Flüssigkeit bis in die Capillare zum Hahn, schliesst denselben und lässt nun eine genau gemessene Zeit hindurch den Strom gehen. Diese Zeit wählt man so lange, dass das entwickelte Gas eben unter dem Korke in dem eingetheilten Rohre sichtbar wird. Hierauf setzt man, während die Gasblasen sich sammeln, das Wasser in dem äusseren Behälter in Bewegung, notirt seine Temperatur, liest den Barometerstand ab und ebenso den Stand der Sperrflüssigkeit im Recipienten und ausserhalb desselben. Die Rechnung wird dann wie folgt ausgeführt:

Es sei v das aus der oberen Ablesung mittelst der Calibertabelle erhaltene Knallgasvolum, in Cubikcentimetern,
„ h die Differenz der Höhen der Sperrflüssigkeit, in Millimetern,
„ d die Dichte der Sperrflüssigkeit (für 20 proc. Säure = 1,14),
„ t die Temperatur des Gases in Graden Celsius,
„ f die Spannkraft des Wasserdampfes im Recipienten, in Millimetern; dieselbe ist bei 20 proc. Säure gleich $^9/_{10}$ der Spannkraft über reinem Wasser zu setzen, welche letztere man den Spannkraftstabellen für den Werth der Temperatur t entnimmt,
„ b_0 der auf 0^0 reducirte Barometerstand,
„ z die Dauer des Stromes in Minuten.

Man erhält dann zunächst den Druck des trockenen Gases:

$$H = b_0 - h \frac{d}{13{,}6} - f$$

und dann das reducirte Gasvolum:

$$v_r = \frac{v}{1 + 0{,}003668\,t} \frac{H}{760},$$

die Stromstärke J ist dann $= \frac{v_r}{z}$.

Zahlenbeispiel:

Dauer des Stromes = 10 Minuten,

Volum des Wasserstoffes 152,0 ccm, entsprechend 228,0 ccm Knallgas,

Temperatur = 14° C.,

Barometerstand (reducirt) = 752,8 mm,

Höhendifferenz der Sperrflüssigkeit = 25 mm,

Dichte der letzteren = 1,14;

$$H = 752{,}8 - 25 \frac{1{,}14}{13{,}6} - \frac{9}{10} \cdot 11{,}9 = 740\,\text{mm},$$

$$v_r = \frac{228 \,.\, 740}{(1 + 0{,}003668 \,.\, 14)\, 760} = 211{,}2, \; J = \frac{2112}{10} = 21{,}12\,\text{Jakobi}.$$

Die Umrechnung aus diesem Maasse in das heute gebräuchliche wird unten gezeigt werden.

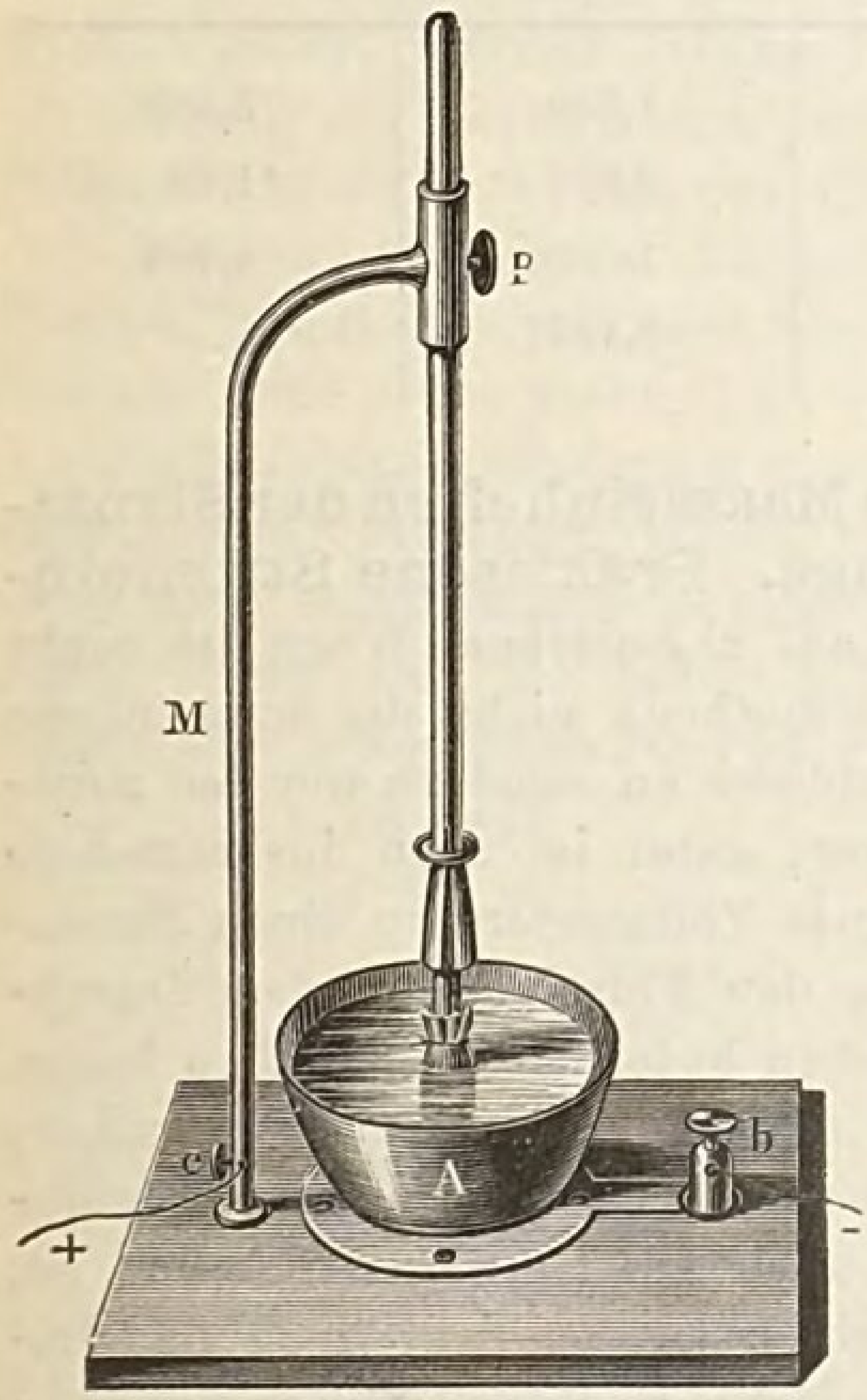
120 **Gewichtsvoltameter, Kupfer-(Silber)voltameter.** Die Umständlichkeiten der Volummessungen an Gasen legten es nahe, diese durch Gewichtsbestimmungen zu ersetzen. Bunsen bediente sich eines Voltameters, bestehend aus einer kleinen Glasflasche mit eingeschmolzenen Platindrähten, welche Platinplatten tragen. Damit das entweichende Knallgas keinen Wasserdampf entführe, muss dasselbe durch ein mit concentrirter Schwefelsäure gefülltes Trockenrohr durchstreichen. Der Gewichtsverlust nach dem Durchgange des Stromes ergiebt die Masse des zersetzten Wassers. Da 1 ccm Knallgas 0,5363 mg wiegt, so hat man nur den Gewichtsverlust in Milligrammen durch 0,5363 und durch die Anzahl der Minuten zu dividiren, um die Stromstärke in demselben Jakobi'schen Maasse zu erhalten, wie durch das Volumvoltameter. Nach einem Vorschlage von Siemens kann man auch die Anzahl Milligramme des in der Zeiteinheit entwickelten Wasserstoffs zur Stromeinheit wählen.

Viel zweckmässiger ist es aber, nicht die Entwickelung von Knallgas, sondern die Ablagerung von Metallen aus ihrer Lösung an der Austrittsstelle des Stromes zur Messung seiner Intensität zu benutzen. Leitet man einen Strom durch eine concentrirte Lösung von

Kupfervitriol von einer Kupferplatte zu einer anderen, so wird die erstere Platte gelöst und ebenso viel Kupfer auf der zweiten Platte abgeschieden. Ebenso wird beim Durchgange eines Stromes durch eine Lösung von salpetersaurem Silber die als Eintrittsstelle benutzte Silberplatte gelöst und eine ebenso grosse Menge Silber an der Austrittsstelle abgeschieden.

Das Kupfervoltameter besteht nun einfach aus einem mit concentrirter Kupfervitriollösung gefüllten Glasgefässe, in welches zwei Platten chemisch reinen (durch den Strom niedergeschlagenen) Kupfers eingetaucht sind. Die Austrittsplatte wird vorher gewogen. Man lässt den zu messenden Strom eine gemessene Zeit hindurchgehen, hebt dann die Austrittsplatte heraus, spült sie mit destillirtem Wasser ab, trocknet mit Löschpapier und durch vorsichtiges Erwärmen auf etwa 100⁰ und wiegt nach dem Erkalten wieder. Die Gewichtsdifferenz, dividirt durch die Stromdauer, giebt ein Maass für die Stromstärke, welches sich auf die anderen Maasse, wie unten gezeigt werden soll, umrechnen lässt. Das Kupfervoltameter giebt, wie Dr. Hammerl*) nachgewiesen hat, verlässliche Resultate, wenn man die Platten im Verhältniss zur Stromstärke nicht zu klein nimmt. Die Stromstärke darf höchstens 7 Ampère per Quadratdecimeter Kathodenfläche betragen, sonst kann es vorkommen, dass die Kupferlösung in der Umgebung der Platten zu rasch erschöpft und die Flüssigkeit sauer wird, was dann zur Entstehung einer Polarisation und anderen Störungen Anlass geben kann. Ist der Abstand der Elektroden geringer als 1,5 cm, so darf der Strom nur geringere Intensität haben, bei 0,35 cm z. B. darf er 4,2 Ampère nicht überschreiten.

Fig. 345.



Noch genauer sind die Angaben des von Poggendorff eingeführten Silbervoltameters, weil die Menge des abgeschiedenen Silbers relativ gross und leicht genau zu wägen ist.

Fig. 345 zeigt ein solches Instrument. Dasselbe besteht aus einem kleinen Platinaschälchen oder Tiegel, welcher auf eine mit der Klemmschraube *b* leitend verbundene Unterlage gestellt und mit einer 15- bis 30 proc. Lösung von salpetersaurem Silber gefüllt wird. In diese Lösung taucht ein von einer Metallklemme getragener Silberstift. Der

*) Wien. Akad. Ber. LXXXVIII, II, S. 278. (1883).

letztere wird mit dem positiven, die Schale mit dem negativen Pole in Verbindung gesetzt. Während sich Silber aus der Lösung auf die Innenseite der Schale niederschlägt, wird der Silberstift gelöst. Damit sich von letzterem nicht Theile ablösen und in die Schale fallen können, wird derselbe mit einem feinen Leinwandläppchen (oder Thoncylinder) umgeben oder am besten ein kleines Glasschälchen untergehängt. Nach beendigter Stromwirkung wird der Rest ausgehoben, die Silberlösung vorsichtig abgegossen, die Schale sammt dem Silber mit destillirtem Wasser gut ausgewaschen, warm getrocknet und nach dem Erkalten gewogen; die Gewichtszunahme giebt die Silbermenge.

Um die mittelst der in diesem und dem vorigen Paragraphen beschriebenen Voltameter gemessenen Stromstärken mit einander vergleichen zu können, theilen wir nachstehende Reductionstabelle mit:

Reductionstabelle zur Umrechnung von Stromstärken.

Cubikcentimeter Knallgas bei 0^0 u. 760 mm Druck	Milligramm Wasser	Milligramm Kupfer	Milligramm Silber
1	0,5363	1,889	6,432
1,865	1	3,622	11,99
1,5294	0,2839	1	3,405
0,1555	0,0834	0,2937	1

121 **Absolute elektromagnetische Maasseinheiten der Stromstärke und der Elektricitätsmenge. Praktische Stromeinheit.** Die Messung der Stromstärke auf chemischem Wege ist nicht immer ausführbar. Einmal giebt diese Methode nicht die momentane Stromstärke in einem bestimmten Augenblicke an, sondern nur den mittleren Betrag während der Versuchsdauer; dann ist noch insbesondere zu bedenken, dass die Einschaltung eines Voltameters in einen Stromkreis wegen des grossen Widerstandes, den Flüssigkeiten dem Durchgange des Stromes darbieten, den letzteren bedeutend schwächen kann, so dass man nicht die ursprünglich zu messende Stromstärke, sondern die durch Einschaltung des Messinstruments bereits verkleinerte Stromstärke zu messen vermag. Wenn es auch auf Umwegen möglich ist, aus der letzteren auf erstere zurückzuschliessen, so liegt doch das Bedürfniss nach Messmethoden vor, welche diesen Nachtheil nur in unmerklichem Grade besitzen.

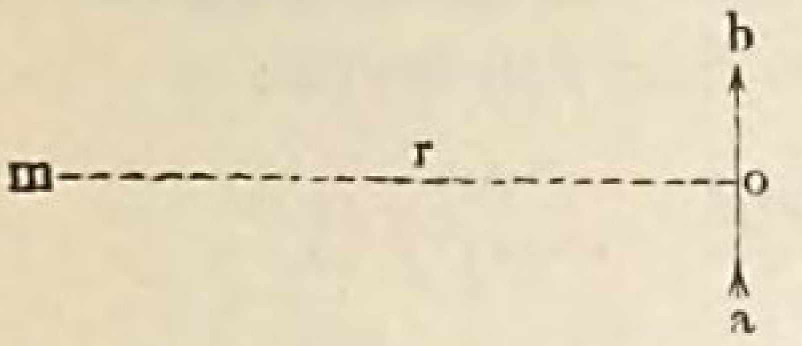
Eine solche Strommessungsmethode ist die elektromagnetische, welche auf der Fernwirkung eines stromdurchflossenen Leiters auf einen Magnet beruht.

Obwohl wir erst in einem späteren Capitel die Gesetze der elektromagnetischen Erscheinungen ausführlich behandeln können, so müssen

wir doch aus praktischen Gründen schon jetzt einige derselben vorläufig kennen lernen und einige Sätze, wenn auch noch ohne Nachweis ihrer Richtigkeit, zu Grunde legen.

In *m* (Fig. 346) befinde sich ein Magnetpol von der Polstärke *m*, im Abstande *r* hiervon, auf die Verbindungslinie *mo* senkrecht gerichtet, der Leiter *ab*. Wird der letztere in der Pfeilrichtung von einem elektrischen Strome*) durchflossen, so übt er auf den Magnetpol *m* eine Kraft aus, welche denselben senkrecht auf die Zeichnungsebene zu bewegen sucht und zwar nach vorn, wenn *m* ein Nordpol, nach rückwärts, wenn es ein Südpol ist. Die Stärke dieser Kraft *f* ist: nach Biot-Savart's Gesetz:

Fig. 346.



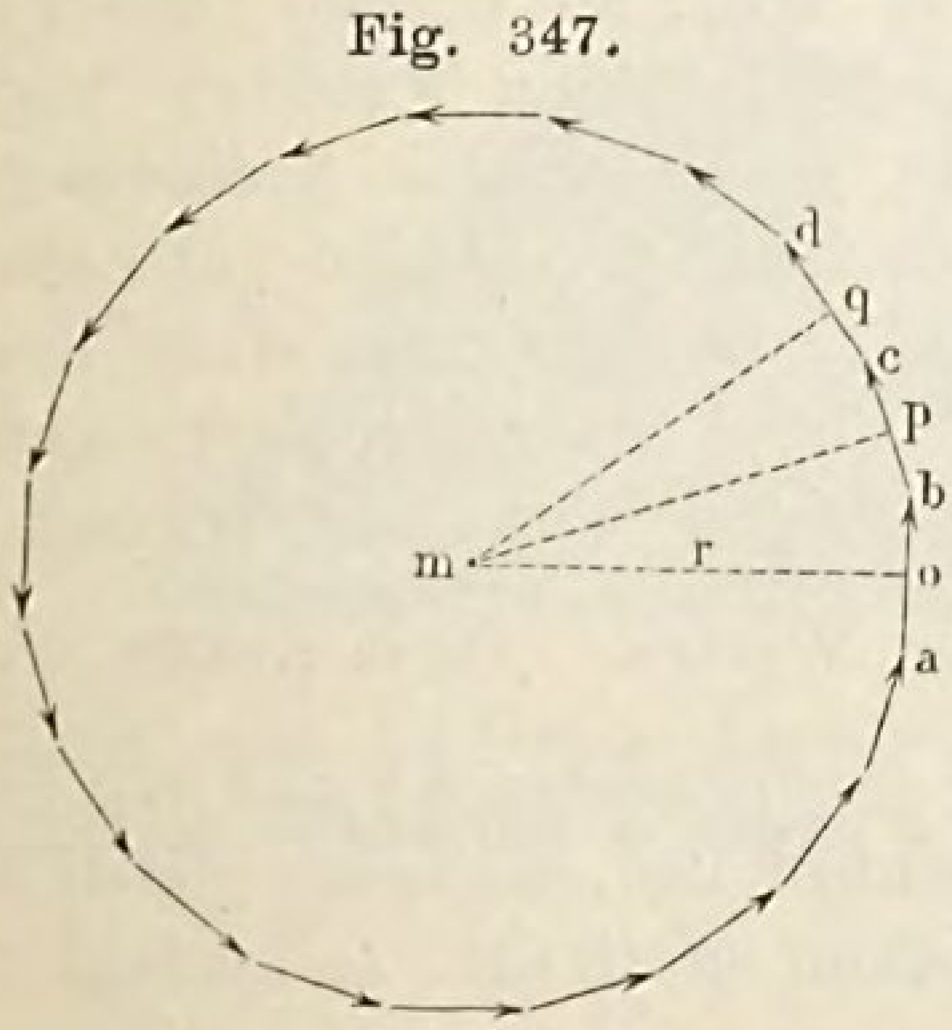
proportional der Stromstärke *J*,
proportional der Stärke des Poles *m*,
proportional der Länge des Leiters $ab = l$,
verkehrt proportional dem Quadrate des Abstandes *r*.

Wir setzen nun mit W. Weber diejenige Stromstärke gleich Eins, welche, einen Leiter von der Länge Eins durchfliessend, auf einen im senkrechten Abstande Eins befindlichen Pol von der Stärke Eins die Kraft gleich Eins ausübt.

Messen wir hierbei Länge, Polstärke und Kraft nach absolutem Maasse, so erhalten wir auch ein absolutes elektromagnetisches Maass der Stromstärke. W. Weber hat seinerzeit die Grundmaasse Millimeter, Milligramm und Secunde angewendet; wir verwenden statt dessen Centimeter, Gramm und Secunde. Demgemäss wird also nach absolutem elektromagnetischem Maasse ein Strom von der Stärke *J*, der einen Leiter von der Länge *l* durchfliesst, auf einen im senkrechten Abstande *r* befindlichen Pol von der Stärke *m* eine Kraft *f* ausüben, welche

$$f = \frac{lmJ}{r^2} \text{ Dynen beträgt} \quad . \quad . \quad (1)$$

Fig. 347.



Einen begrenzten Leiter wie *ab* können wir experimentell nicht verwirklichen. Wohl aber können wir, wie in Fig. 347 dargestellt ist, eine Anzahl solcher Leiter derart um den Pol *m* herum gruppiren, dass jeder derselben in der gleichen relativen Lage zum Pole sich befindet, mithin auch die gleiche bewegende Kraft auf ihn ausübt. Wir gelangen so zur

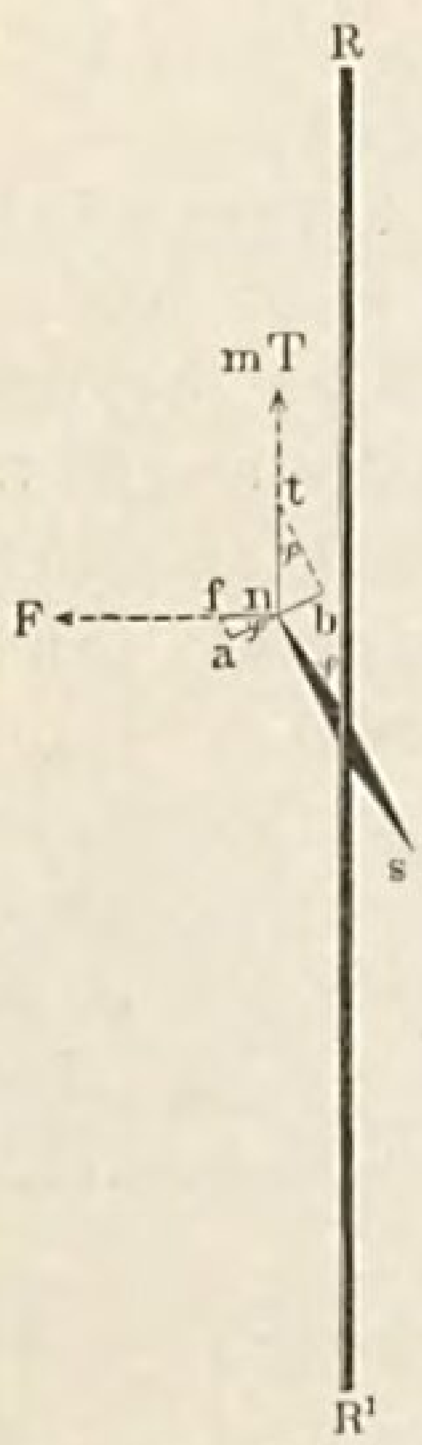
*) Wenn von der Richtung eines Stromes gesprochen wird, versteht man darunter stets die Richtung, in welcher sich die positive Elektricität bewegt.

Anwendung eines Kreisstromes. Nur in einem Kreise ist es strenge richtig, dass die Stromrichtung überall senkrecht auf der Verbindungslinie des Poles mit dem Leiter steht. Die bewegende Kraft des Kreisstromes wird natürlich so viele Male grösser sein, als die des Stromes im Leiter *ab*, so viele Male der Umfang des Kreises den Leiter an Länge übertrifft. Der Umfang beträgt aber $2r\pi$. Setzen wir dies statt l in die Formel (1), so erhalten wir für die Kraft F des Kreisstromes vom Radius r bei der Stromstärke J auf den Pol m den Ausdruck:

$$F = \frac{2r\pi m J}{r^2} = \frac{2\pi m J}{r} \quad \ldots \ldots \quad (2)$$

Die Formel (2) sagt, dass, wenn $m = 1$ wäre, die Kraft $F = \frac{2\pi J}{r}$ betragen würde. Nach der Definition der Intensität eines magnetischen Feldes am Schlusse des §. 26 heisst dies mit anderen Worten: Ein Kreisstrom von der Stromstärke J bringt für sich allein im Centrum desselben ein magnetisches Feld von der Intensität $\frac{2\pi J}{r}$ hervor. Die Kraftlinien desselben gehen durch das Centrum in der Richtung senkrecht auf die Kreisebene. Stellen wir daher den Kreis in die Ebene des magnetischen Meridians, so steht die Kraftrichtung des Kreisstromes senkrecht auf der horizontalen Componente des Erdmagnetismus. Hierauf wird nun die Messmethode gegründet. Es stelle in Fig. 348 RR' den von oben gesehenen, in den magnetischen Meridian gestellten Kreisstrom vor. R liege gegen Norden. Im Centrum des Ringes befinde sich die horizontal schwingende Magnetnadel ns. Ist deren Länge klein gegen RR', so werden ihre Pole auch in abgelenkter Lage sich an Punkten befinden, wo die magnetische Intensität des Kreisstromes von jener im Ringcentrum nicht erheblich abweicht.

Fig. 348.



Der Nordpol der Nadel, dessen Polstärke $= m$, wir dmit einer Kraft mT gegen Norden gezogen, wenn T die horizontale Componente des Erdmagnetismus bedeutet. Der Kreisstrom wirkt auf denselben Pol mit der Kraft $F = \frac{2\pi m J}{r}$ gegen Westen. Diese Kräfte werden die Nadel so lange drehen, bis die Componenten nb und na derselben, welche in die Richtung der Tangente fallen, einander gleich geworden sind. Beträgt die Ablenkung dann φ Grade, so besteht die Gleichgewichtsbedingung:

$$nb \, . \sin\varphi = na \, . \cos\varphi,$$

also:

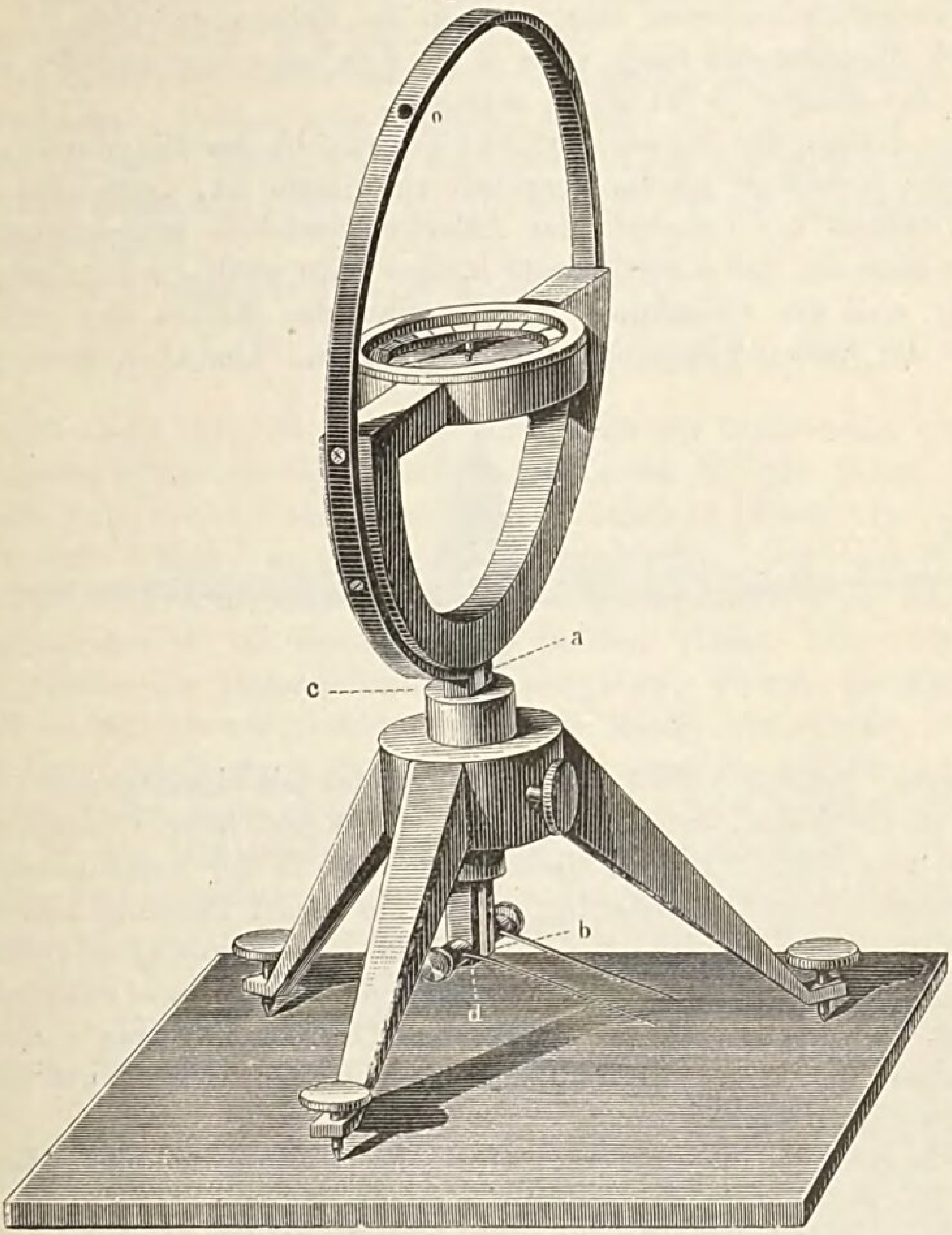
$$m T \sin \varphi = \frac{2 \pi m J}{r} \cos \varphi,$$

m hebt sich beiderseits und man erhält:

$$J = \frac{r T}{2 \pi} \tang \varphi \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (3)$$

Wenn man den Leiter in dem Kreise n mal herumführt, so wird natürlich auch die Wirkung desselben n fach vergrössert, und man muss

Fig. 349.



daher, um wiederum dasselbe Strommaass zu erhalten, die Peripherie n mal in Rechnung bringen, so dass man in diesem Falle erhält:

$$J = \frac{r T}{2 n \pi} \tang \varphi \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (3a)$$

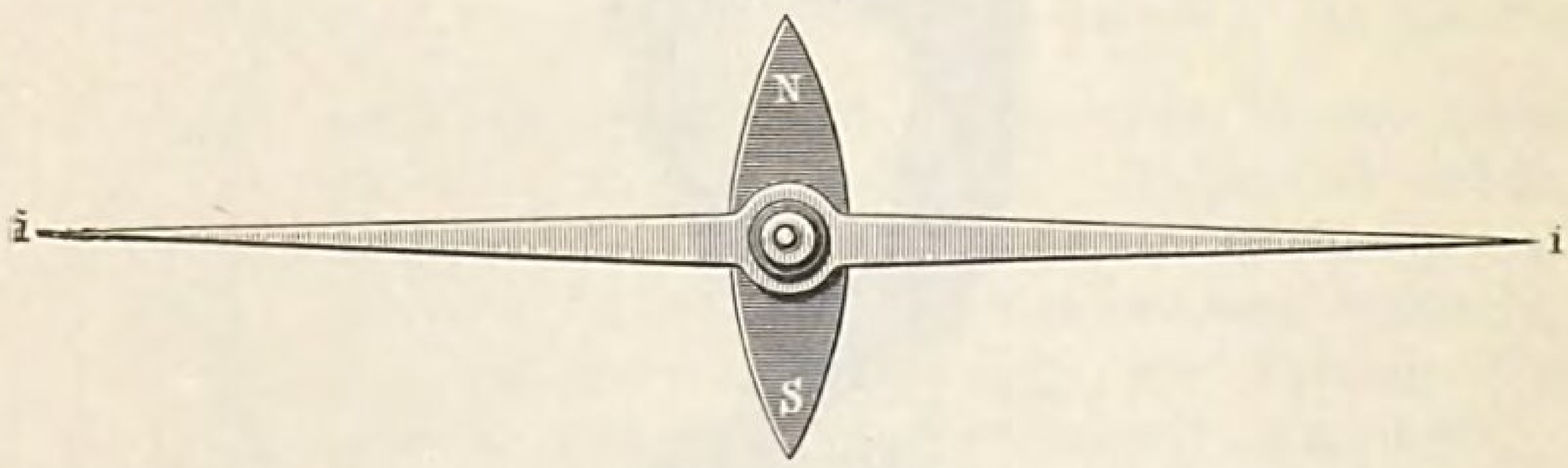
Der Coëfficient $\frac{r T}{2 n \pi}$ wird der Reductionsfactor der Bussole auf absolutes Maass genannt.

Der zu diesen Messungen geeignete Apparat, die Weber'sche Tangentenbussole, ist in Fig. 349 (a. v. S.) abgebildet. Eine Bussole befindet sich in der Mitte eines verticalen Ringes, welcher durch einen dicken Kupferstreifen von prismatischem oder kreisförmigem Querschnitte gebildet wird. Unten endet der Kupferring mit zwei geraden Kupferstreifen *ab* und *cd*, welche durch ein zwischen dieselben gelegtes Stück Hartgummi oder Elfenbein von einander isolirt sind. Jedes dieser gerade ausgestreckten Enden des kreisförmig gebogenen Streifens trägt unten eine Schraubklemme zum Einschrauben der Zuleitungsdrähte.

Die Magnetnadel kann etwa 3 bis 4 cm lang sein und der Durchmesser des Ringes 20 bis 40 cm betragen.

Die Länge der Nadel darf höchstens $^1/_5$ des Ringdurchmessers betragen; je kleiner sie im Vergleich zu diesem ist, desto genauer ist die Stromkraft der Tangente des Ablenkungswinkels proportional. Je kleiner aber die Nadel wird, desto kleiner wird auch die Theilung, auf welcher man die Ablenkung abliest, wenn der Radius des getheilten Kreises der halben Länge der Nadel gleich ist. Um aber, wenn grosse

Fig. 350.



Genauigkeit gefordert wird, eine kleine Nadel mit einem grossen Theilkreise zu verbinden, befestigt man an der Nadel feine Glasfäden, wo möglich von dunkelfarbigem Glase, so dass sie in der Verlängerung der magnetischen Axe der Nadel liegen und bis zu der Theilung hinreichen.

Noch zweckmässiger ist es nach Siemens, den aus Aluminiumblech verfertigten Index rechtwinkelig zur kurzen Magnetnadel zu befestigen, wie Fig. 350 zeigt. Den Nullpunkt der Theilung hat man alsdann in demjenigen Punkte des Kreisumfanges anzubringen, welcher um 90° von der Ebene des Ringes absteht.

Eine sehr genaue Ablesung wird auch dadurch möglich, dass der Boden der Bussole ein Spiegel ist; das Auge ist nur dann in der zum Ablesen richtigen Stellung, wenn die Spitze der Nadel mit ihrem Spiegelbilde zusammenfällt.

Die in Fig. 349 (a. v. S.) dargestellte Einrichtung der Tangentenbussole hat den Nachtheil, dass die Starrheit der in *a* und *b* eingeklemmten Zuleitungsdrähte eine genaue Einstellung der Nadel auf den Nullpunkt sehr erschwert, wenn nicht unmöglich macht. Es wird deshalb von Manchen die ursprüngliche Einrichtung Weber's vorgezogen, nach welcher die beiden vertical herabgehenden Enden des Kupferringes in

getrennte Quecksilbergefässe geleitet werden, mit denen die Zuleitungsdrähte in passender Weise in Verbindung gesetzt werden. Auch kann man die Einrichtung treffen, dass Ring und Bussole zusammen auf dem Gestell drehbar sind.

Um der Magnetnadel eine grössere Beweglichkeit zu sichern, hat man dieselbe wohl auch an einem Coconfaden aufgehängt, statt sie mittelst eines Achathütchens auf einer Stahlspitze spielen zu lassen. Diese Aufhängung empfiehlt sich aber mehr für feinere Instrumente, bei welchen mit Spiegel und Scala abgelesen wird.

Als Zahlenbeispiel einer solchen Strommessung nach absolutem elektromagnetischem Maasse mag folgendes dienen:

Der (mittlere) Radius r des einfachen Ringes betrage 18,85 cm, die Horizontalcomponente T sei $= 0,2$ (C. Gr. S.), der Strom bewirke eine Ablenkung von 45^0.

Da $n = 1$, $tang\ 45^0$ auch $= 1$, so ist:

$$J = \frac{18,85 \, . \, 0,2}{2 \, . \, 3.1415} = 0,6 \text{ (C. Gr. S.).}$$

W. Weber hat, wie oben erwähnt, statt des Centimeters und des Gramms das Millimeter und das Milligramm zu Grunde gelegt. Dadurch wurden sowohl r als T durch eine 10 mal so grosse Zahl, mithin J durch eine 100 mal so grosse Zahl ausgedrückt. Die von Weber aufgestellte Einheit der Stromstärke war also ursprünglich 100 mal kleiner als die des (C. Gr. S.)-Systems. In dem (1863, 1867) von der British Association angenommenen Maasssystem, welches ebenfalls auf dem (C. Gr. S.)-System beruht, wurde die Menge Elektricität, welche per Secunde durch einen Strom, den wir jetzt 1 Ampère nennen, durch den Querschnitt geführt wird, mit dem Namen Weber belegt und daher der betreffende Strom „1 Weber per Secunde“ genannt*). Angeblich um den hieraus entstehenden Verwechselungen vorzubeugen, hat dann der elektrische Congress, welcher 1881 in Paris tagte, den Namen Weber bei der Strombezeichnung ganz fallen lassen und einen Strom von $^1/_{10}$ absoluten Einheiten des (C. Gr. S.)-Systems als „praktische Stromeinheit“ mit dem Namen Ampère belegt, wofür abgekürzt A. oder Amp. geschrieben wird. Berücksichtigt man, dass das Wesentliche in dem von Weber geschaffenen Maasssystem nicht die Wahl zwischen Centimeter und Millimeter, Gramm und Milligramm war, sondern die Zurückführung auf die Fundamentalmaasse überhaupt, so wird man es nur bedauern können, dass der Name des Schöpfers dieses genialen Maasssystems bei Seite geschoben wurde. Nichts kann uns übrigens hindern, das absolute Maasssystem, so weit es magnetische Messungen betrifft, das Gauss'sche, soweit es elektrische Messungen betrifft, das Weber'sche zu nennen und in diesem Sinne sind wir berechtigt, auch künftig 10 Ampère = Stromeinheit (C. Gr. S.)

*) Diese Elektricitätsmenge heisst jetzt 1 Coulomb (s. S. 406).

= Stromeinheit (Weber's System) oder kurz = Stromeinheit (Weber) zu schreiben.

Die Stärke eines Stromes, welcher in einer Tangentenbussole vom Radius r, der Windungszahl n bei horizontaler Componente $= T$ die Ablenkung φ giebt, beträgt demnach:

$$\frac{5\,r\,T}{\pi\,n}\,tang\,\varphi \text{ Amp.} = \frac{r\,T}{2\,\pi\,n}\,tang\,\varphi \text{ (Weber C. Gr. S.)},$$

die Stromstärke des obigen Zahlenbeispiels betrüge demnach:

$$6 \text{ Amp.} = 0{,}6 \text{ (Weber C. Gr. S.)}^{*}).$$

Von der elektromagnetischen Einheit der Stromstärke leitet sich die elektromagnetische Einheit der Elektricitätsmenge ab; es ist dies die Menge von Elektricität, welche bei dem Strome von der Stärke 1 in der Zeiteinheit durch den Querschnitt des Leiters fliesst. Die der praktischen Stromeinheit 1 Amp. entsprechende Einheit der Elektricität wurde vom elektrischen Congress mit dem Namen Coulomb belegt.

Im §. 65 haben wir als elektrostatisches Maass der Elektricitätsmenge jene Menge von Elektricität bezeichnet, welche eine ihr gleiche Menge in der Entfernung von 1 cm mit der Kraft = 1 Dyne abstösst. Wir theilen schon hier mit, dass die elektromagnetische Einheit des (C. Gr. S.)-Systems nahe 30,000,000,000 $= 3 \, . \, 10^{10}$ elektrostatischen Einheiten desselben Systems, entspricht.

122 **Zurückführung der Voltameterangaben auf absolutes Strommaass Aichung der Tangentenbussole mittelst Voltameters.** Um die nach Jacobi'schem Maasse, d. i. mit dem Knallgasvoltameter oder mit einem der anderen Voltameter gemessene Stromstärke auf absolute Einheiten nach dem (C. Gr. S.)-System oder

*) Wollte man der Tangentenbussole mit Einer Windung solche Dimensionen geben, dass die Winkeltangenten direct die Stromstärke in absoluten Einheiten (C. Gr. S.) ausdrücken, so müsste man $r = \frac{2\pi}{T}$ machen. Für $T = 0{,}2$ würde der Radius $r = 31{,}416$ cm werden. Würde man der Bussole 10 solcher Windungen geben, so würden die Winkeltangenten direct die Stromstärke in Amp. ergeben. Da man an einer gewöhnlichen Bussole die Winkel kaum genauer als auf 12 Minuten abzulesen vermag, so ergiebt sich bei Ablesungen von unter 25° und über 65° ein Fehler in der Stromstärke von 1 Proc., welcher bei Winkeln von 5° und 85° auf 4 Proc. ansteigt. Man hat daher die Messungen so einzurichten, dass die Ablesungen nicht zu weit von 45° erfolgen, was bei verschieden starken Strömen durch verschiedene Windungszahl oder, wie später gezeigt werden soll, durch Nebenschlüsse erreichbar ist. Ueber die Correctionsrechnungen, welche bei genauen Messungen in Folge der nicht zu vernachlässigenden Nadellänge und in Folge des Querschnittes der Windungen, sowie wegen etwaiger Torsion, anzubringen sind, verweisen wir auf F. Kohlrausch's praktische Physik, VIII. Auflage, S. 290.

auf Ampère umrechnen zu können, muss man wissen, wie viel Cubikcentimeter Knallgas, beziehungsweise wie viel Milligramm Wasser, Kupfer oder Silber ein Strom von der Stärke Eines Ampère per Minute oder Secunde ausscheidet oder zersetzt. Um dies zu ermitteln, muss man einmal ein solches Voltameter und eine Tangentenbussole von genau gemessenem Radius an einem Orte, wo die Horizontalcomponente des Erdmagnetismus genau bekannt ist, gleichzeitig hinter einander in ein und denselben Stromkreis einschalten und die nach gemessener Zeit erhaltenen Angaben des Voltameters mit den während dieser Zeit an der Bussole gemessenen Stromstärken vergleichen. Diese wichtige Arbeit ist von mehreren Physikern mit besonderer Sorgfalt ausgeführt worden und hat nachfolgende Resultate ergeben, die wir F. Kohlrausch's praktischer Physik entnehmen:

Der Strom von der Intensität 1 Amp. zersetzt oder scheidet aus:

	Silber	Kupfer	Wasser	Knallgas (0^0,760 mm)
in 1 Secunde:	1,118 mg	0,3284 mg	0,0933 mg	0,1740 ccm
in 1 Minute:	67,08 „	19,70 „	5,59 „	10,44 „

Diese Zahlen werden die elektrochemischen Aequivalente des Silbers, Kupfers, Wassers genannt.

Sind diese Zahlen einmal bekannt, so kann man sich derselben bedienen, um umgekehrt aus den Angaben eines Voltameters den Reductionsfactor für eine Tangentenbussole zu ermitteln, welche man zugleich mit dem Voltameter von einem und demselben Strome durchfliessen lässt. Findet man bei Anwendung des Kupfervoltameters die per Minute niedergeschlagene Kupfermenge $= M$ Milligramm, so hatte der Strom eine Stärke von $\frac{M}{19,70}$ Amp. War die gleichzeitige Ablesung an der Bussole $= \alpha$, so ist

$$\frac{M}{19,70} = R \; tang \, \alpha, \text{ also } R = \frac{M}{19,70 \; tang \, \alpha}$$

der Reductionsfactor der Tangentenbussole auf Ampère.

Diese Methode hat den Vortheil, dass sie auch zur Aichung solcher Strommesser dienen kann, bei welchen die Proportionalität zwischen Stromstärke und Tangente des Ablenkungswinkels nur angenähert gilt, z. B. bei Bussolen, deren Nadeln gegen die Ringdimensionen nicht klein genug sind. Man graduirt dann die Bussole in Abtheilungen etwa von 5 zu 5 Grad und erhält für jede derselben einen speciellen Reductionsfactor. Auch auf Strommesser, welche gar nicht auf dem Princip der Tangentenbussole beruhen, ist diese empirische Graduirungsmethode anwendbar.

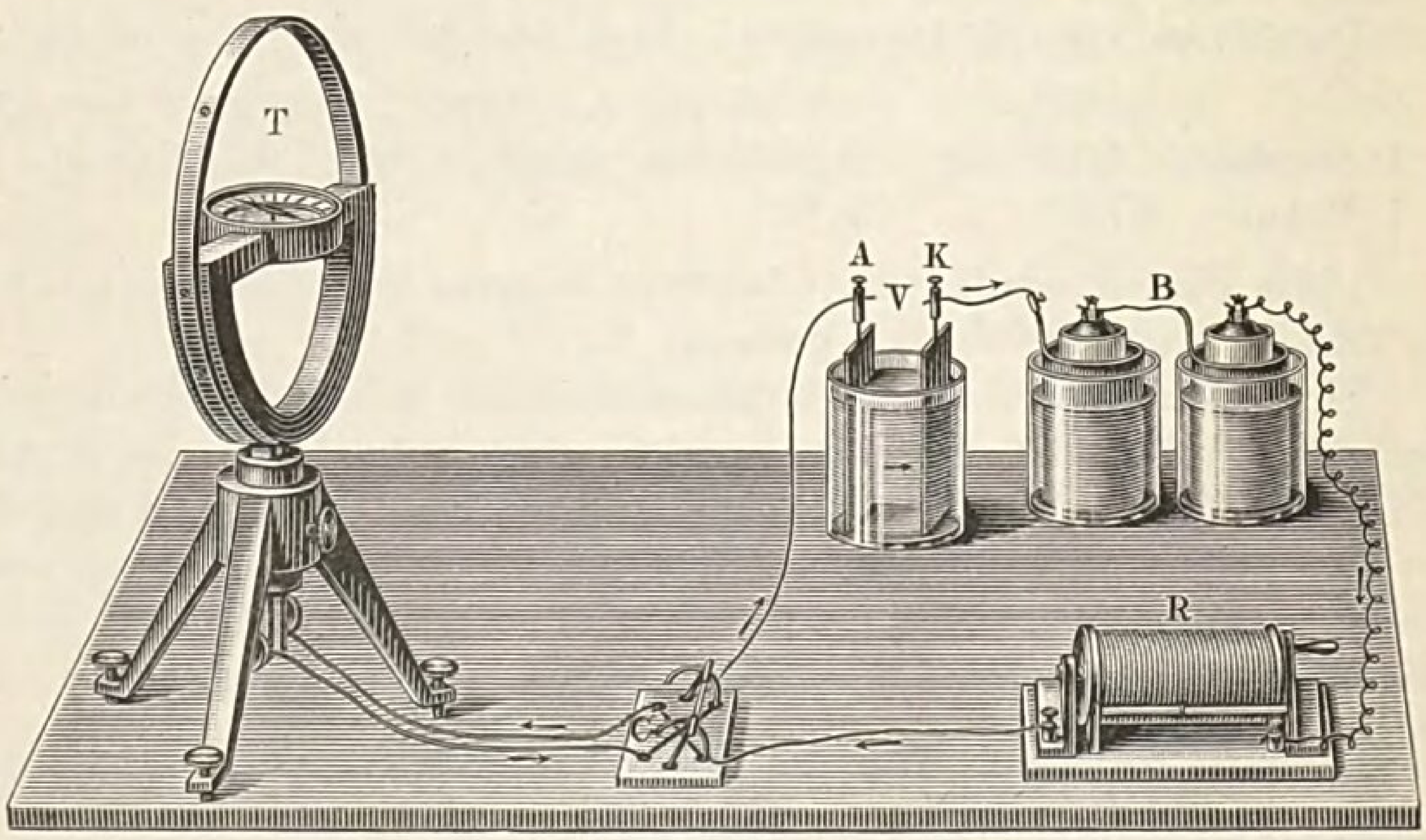
Fig. 351 (a. f. S.) zeigt die ungefähre Anordnung der Apparate, *T* die Bussole, *V* das Voltameter, *B* die Batterie*), *C* den Commutator.

*) Deren Elementenzahl entsprechend zu vermehren ist.

R stellt einen Apparat (Rheostaten) vor, den wir nächstens kennen lernen werden, welcher nur dazu bestimmt ist, durch Einschaltung von Drahtwindungen in den Stromkreis die Stärke des Stromes auf die gewünschte Grösse herabzusetzen.

Bei der Ausführung eines solchen Versuches ist der Umstand störend, dass der Strom der Elemente während der Beobachtungszeit seine Stärke selten ganz unverändert beibehält. Man muss daher die Ablesung an der Bussole in gleichen Zeitintervallen wiederholen, um einen Mittelwerth berechnen zu können. Dabei empfiehlt es sich überdies, die

Fig. 351.



Stromrichtung in der Bussole (aber nicht im Voltameter) regelmässig zu wechseln, um dadurch die Fehler in der Nullstellung der Nadel und allfällige Aenderungen des magnetischen Meridians zu eliminiren. Dabei ist darauf zu achten, dass beim Wechsel der Strom keine erhebliche Zeit ganz unterbrochen bleibe, was durch Anwendung eines zweckmässigen Commutators und rasche Handhabung desselben zu erzielen ist. Die Nadelstellung wird, um Excentricitätsfehler zu vermeiden, stets an beiden Spitzen abgelesen; Parallaxenfehler werden durch Anwendung eines Spiegels vermieden. Da die Nadel unmittelbar nach Stromschluss oder Stromwechsel wegen Schwingens nicht abgelesen werden kann, so verlegt man die Ablesezeit auf die Mitte jeder Minute. Folgendes Zahlenbeispiel mag dies erläutern:

Gewicht der Kupferplatte vorher $P = 90{,}2000$ g.

Zeit		Ablesung Nordende	Südende	Mittel
0′	der Strom wird geschlossen			
0′ 30″		44⁰ 42′	40⁰ 36′	44⁰ 39′
1′	der Strom wird gewechselt			
1′ 30″		44⁰ 36′	44⁰ 30′	44⁰ 33′
2′	der Strom wird gewechselt			
2′ 30″		44⁰ 36′	44⁰ 24′	44⁰ 27′
3′	der Strom wird gewechselt			
3′ 30″		44⁰ 32′	44⁰ 24′	44⁰ 27′
4′	der Strom wird gewechselt			
4′ 30″		44⁰ 32′	44⁰ 24′	44⁰ 27′
5′	der Strom wird gewechselt			
5′ 30″		44⁰ 24′	44⁰ 18′	44⁰ 21′
6′	der Strom wird gewechselt			
6′ 30″		44⁰ 24′	44⁰ 18′	44⁰ 21′
7′	der Strom wird gewechselt			
7′ 30″		44⁰ 18′	44⁰ 18′	44⁰ 18′
8′	der Strom wird gewechselt			
8′ 30″		44⁰ 18′	44⁰ 12′	44⁰ 15′
9′	der Strom wird gewechselt			
9′ 30″		44⁰ 12′	44⁰ 12′	44⁰ 12′
10′	der Strom wird unterbrochen		Mittel α =	44⁰ 36′ *)
			log tang α =	9,9939359

Die gewaschene und getrocknete Kupferplatte wog $P' = 91{,}3808$ g
Gewicht des abgesetzten Kupfers $P' - P = 1{,}1808$ g $= 1180{,}8$ mg
Gewicht des abgesetzten Kupfers per Minute: Cu $=$ 118,08 „

$$\text{Mittlere Stromstärke in Amp.} = \frac{\text{Cu}}{19{,}70} = \frac{118{,}08}{19{,}70} = 6{,}000$$

$$\log R = \log 6{,}000 - \log \tan 44^0\,36' = 0{,}7781513 - 9{,}9939359 + 10$$
$$= 0{,}7842154.$$

Mithin der gesuchte Reductionsfactor: $R = 6{,}0844$.

Gleichheit der Stromstärke an allen Stellen des Stromkreises. 123
Nachdem wir in den vorausgehenden Paragraphen Methoden kennen gelernt haben, um Stromstärken zu messen, wollen wir nun untersuchen, wie sich die Stromintensität in verschiedenen Thei-

*) Strenge genommen sollte nicht von den Winkeln, sondern von den Tangenten derselben das Mittel gerechnet werden. Da jedoch die Winkel bei einem gut geleiteten Versuche immer nur wenig differiren, so darf man sich zur Abkürzung der Rechnung erlauben, statt des Mittels der Tangenten die Tangente des Mittels der Winkel zu nehmen.

len eines Schliessungskreises verhält und von welchen Umständen sie abhängig ist. Dabei denken wir uns vor der Hand einen einzigen in sich geschlossenen ungetheilten Stromkreis, wie er erhalten wird, wenn man die Pole eines Elementes oder einer Batterie durch eine Reihe von Leitern schliesst, deren jeder, wie wir annehmen, für sich einen constanten Querschnitt hat.

Obwohl es von vornherein zu erwarten ist, dass die Stromstärke an allen Stellen eines Schliessungskreises gleich gross sei, da es sonst zu einer Stauung der Elektricität kommen müsste, so hat man doch den directen experimentellen Beweis hierfür zu liefern für nöthig befunden. Es geschah dies zuerst durch Barlow 1825 durch einen einfachen Versuch, den wir etwa in folgender Weise wiederholen können.

Wir verbinden die Pole $+P$ und $-P$ einer Batterie (Fig. 352) durch einen langen Draht, den wir so anordnen, dass die Theile *ab*, *cd*

Fig. 352.

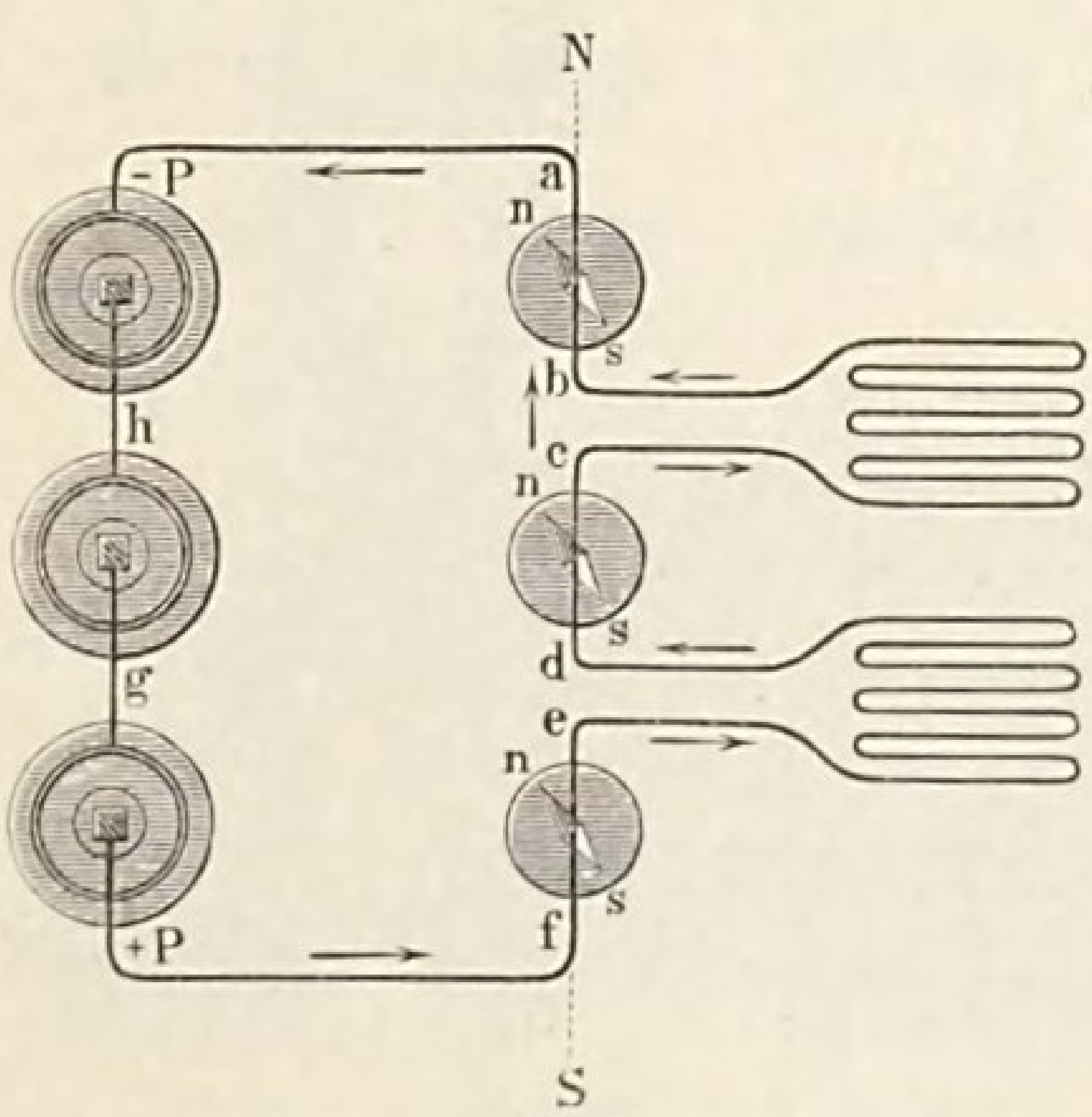
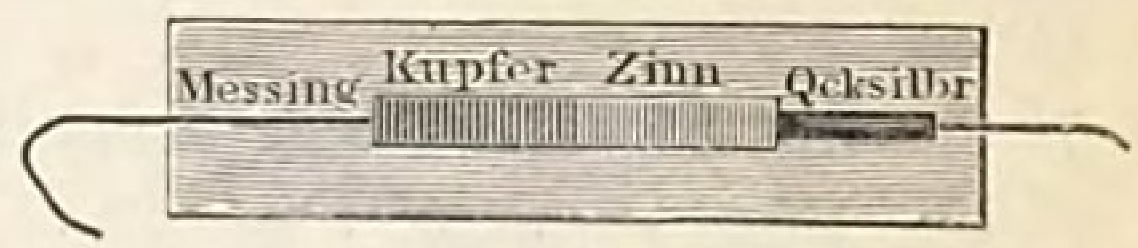


Fig. 353.



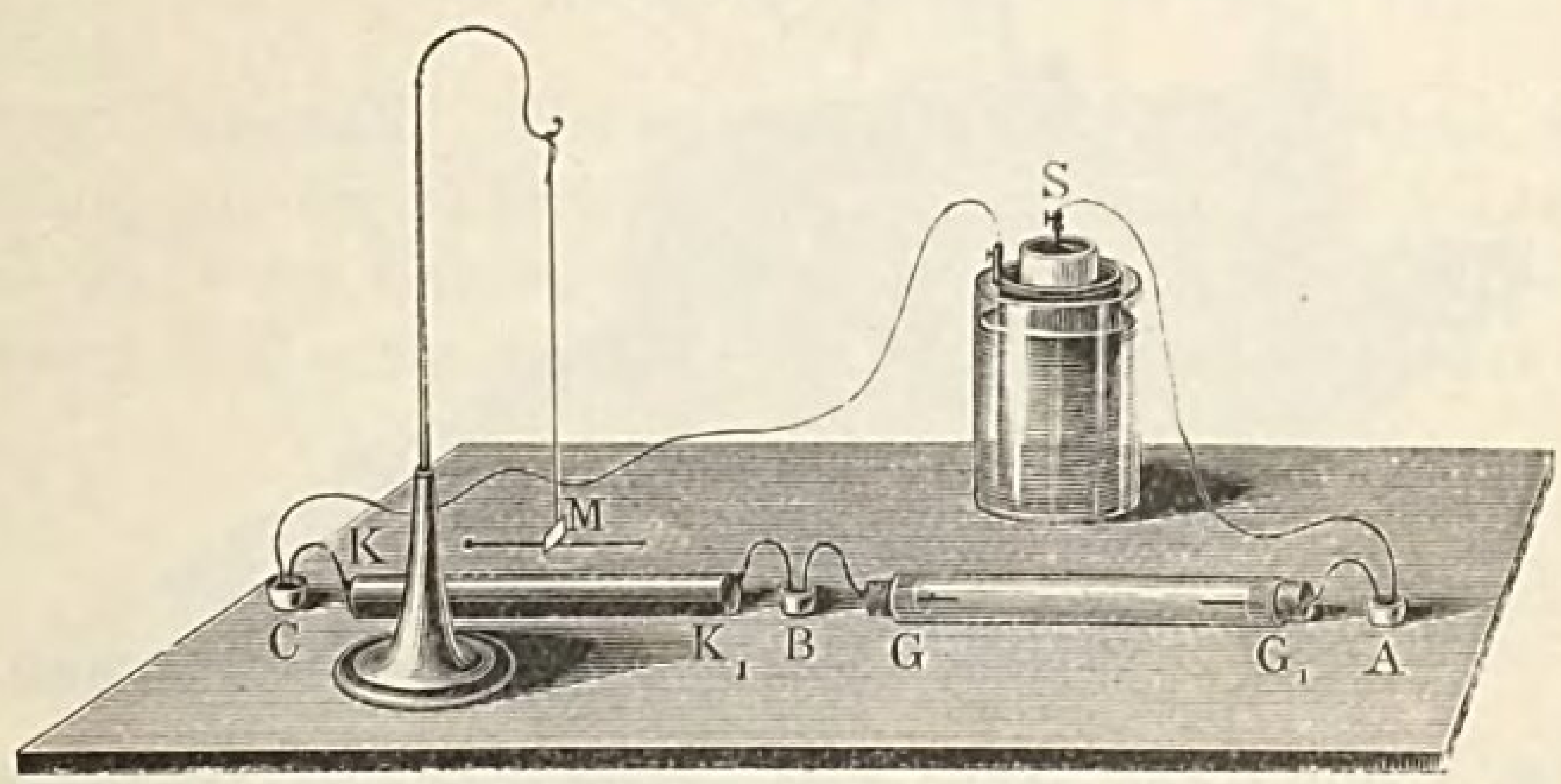
und *ef* desselben, welche beiden Enden und der Mitte desselben angehören, in der Richtung des magnetischen Meridians horizontal ausgespannt sind. Legen wir dann nach einander in gleicher Höhe unter *ab*, *cd* und *ef* eine Bussole oder schalten wir an diesen Stellen eine Tangentenbussole ein, so wird deren Nadel an allen drei Stellen gleich stark abgelenkt, ein Beweis, dass der Strom in allen Theilen gleiche Intensität besitzt. Wir könnten auch ein Voltameter einmal zwischen *a* und *b*, dann zwischen *c* und *d*, *e* und *f* einschalten und würden, wenn sonst der Strom constant blieb, jedesmal die gleiche Anzahl Cubikcentimeter Knallgas entwickelt sehen. Dies würde auch dann der Fall sein, wenn wir das Voltameter irgendwo zwischen den einzelnen Elementen der Batterie, also bei *g* oder *h*, einschalten würden.

Fechner hat dann 1831 gezeigt, dass diese Gleichheit der Stromintensität an allen Stellen des Stromkreises auch dann erhalten bleibt, wenn dieser Kreis aus verschiedenartigen Leitern, sowohl festen als flüssigen, besteht. Er bediente sich einer Vorrichtung, welche in Fig. 353 abgebildet ist. Eine in einem Brett ausgehöhlte Rinne wurde theils mit Quecksilber, theils mit Streifen aus verschiedenen Metallen von verschiedener Dicke ausgefüllt. Der so zusammengesetzte Leiter wurde derart in einen Stromkreis eingeschaltet, dass er horizontal und senk-

recht auf den magnetischen Meridian gerichtet war. Eine über den einzelnen Streifen aufgehängte Magnetnadel erhielt dann durch den Strom eine Vergrösserung ihrer Richtkraft und daher auch eine Verkürzung ihrer Schwingungsdauer, welche aber für alle Theile des Leiters gleich gross war.

Um auch für nichtmetallische Flüssigkeiten diesen Nachweis zu führen, kann man eine Versuchsanordnung nach Fig. 354 benutzen. Die Poldrähte des Elementes S führen zu den Quecksilbernäpfen A und C. In der Mitte zwischen diesen steht das Näpfchen B. Zwischen B und C ist der Metallstab KK_1, zwischen B und A eine Glasröhre GG_1 eingeschaltet, welche z. B. Kupfervitriollösung enthält. Ihre Enden sind durch Korke verschlossen, durch welche Kupferdrähte hineinragen. Die Richtung CBA fällt in den magnetischen Meridian. Eine über KK_1 aufgehängte Magnetnadel erfährt eine Ablenkung, die am besten mittelst Spiegel und Scala beobachtet wird. Vertauscht man nun den Metallstab KK_1 durch die Flüssigkeitssäule GG_1, so ändert sich die Ab-

Fig. 354.



lenkung nicht. Daraus folgt also, dass auch in den aus Flüssigkeiten bestehenden Theilen eines Stromkreises dieselbe Stromintensität herrscht wie in den übrigen Theilen desselben Stromkreises. Dies gilt sogar auch von jenen Flüssigkeiten, welche das den Strom erzeugende Element bilden. Man kann dies zeigen, indem man in Fig. 354 das Element ausschaltet, S mit C durch einen Draht verbindet und statt der Flüssigkeitssäule GG_1 ein Element gleicher Form mit dieser einschaltet. Man erhält ein solches durch Anbringung eines porösen Diaphragmas mitten in der Glasröhre, deren eine Hälfte man mit Kupfervitriol, deren andere mit Zinkvitriol füllt und deren Zuleitungsdrähte man einerseits aus Kupfer, andererseits aus amalgamirtem Zink herstellt. Das so gebildete Daniell'sche Element liefert dann den Strom, welcher die Magnetnadel ablenkt. Diese Ablenkung bleibt gleich gross, wenn man das Element an Stelle des Metallstabes einschaltet und diesen dafür an Stelle des Elementes giebt.

Durch die beschriebenen Versuche ist folgender Satz bewiesen:

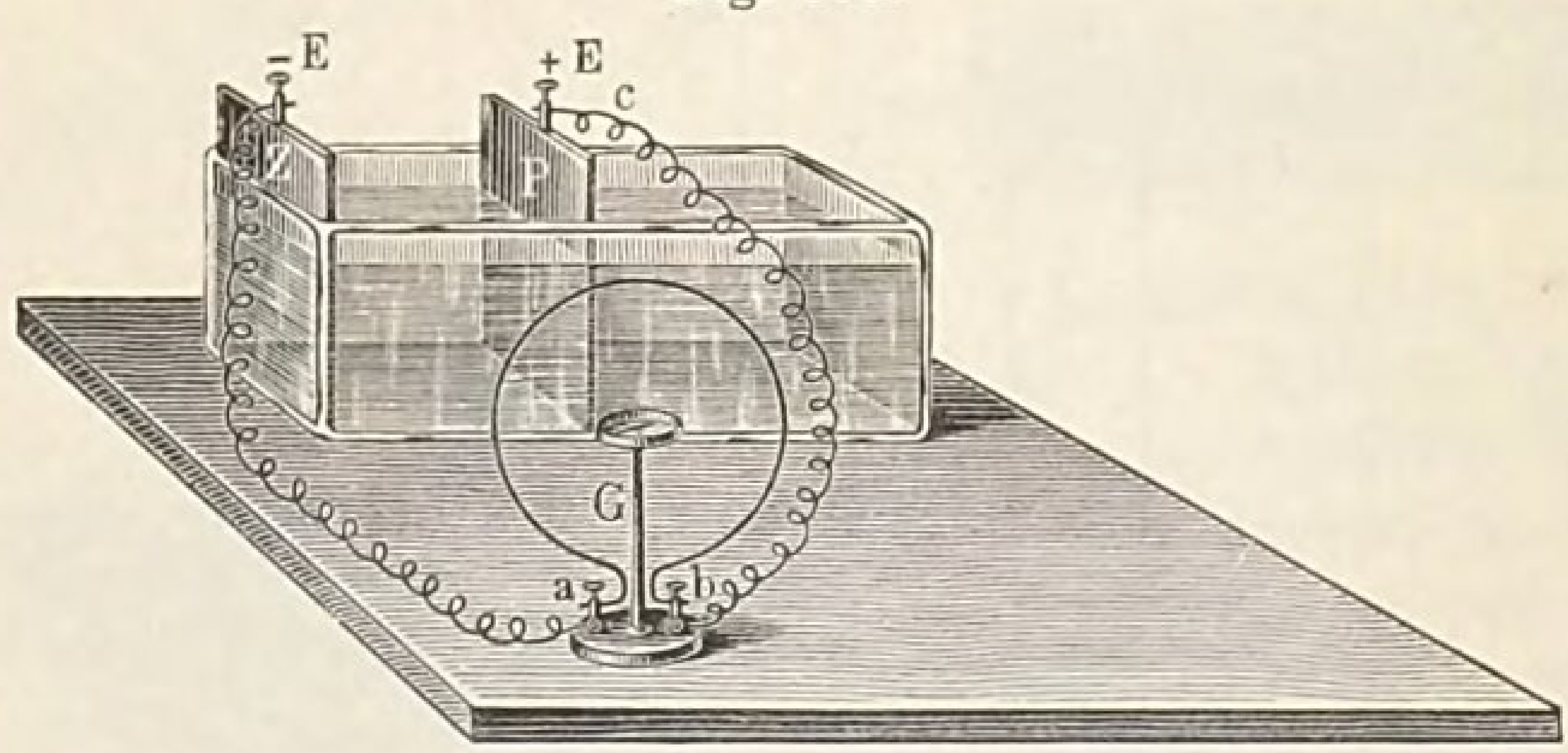
Die Intensität eines Stromes ist in allen Theilen seiner Leitung, mag dieselbe wie sonst immer beschaffen sein.

dieselbe. Mit Rücksicht darauf, dass wir die Stromstärke durch die Menge der positiven Elektricität definiren, die in der Zeiteinheit durch den Querschnitt des Leiters fliesst, können wir demnach obigen Satz auch in folgender Form aussprechen:

Durch jeden Querschnitt der Leitung fliesst eine gleiche Menge von Elektricität.

124 **Ohm'sches Gesetz; experimenteller Nachweis desselben.** Wir haben nun zu untersuchen, von welchen Umständen die Stromstärke abhängt. Zu diesem Zwecke denken wir uns einige Versuche mit Hilfe eines Apparates ausgeführt, welcher durch Fig. 355 dargestellt wird. Derselbe besteht aus einem Elemente, z. B. einer Zink- und einer Platinplatte Z und P, welche in einen mit verdünnter Schwefelsäure gefüllten parallelepipedischen Trog in veränderlichem Abstande eingehängt werden können. Die beiden Polklemmen $+ E$ und $- E$ sind durch

Fig. 355.



Drähte bei a und b mit einer Tangentenbussole in Verbindung. Die letztere zeigt bei dem in der Fig. 355 angedeuteten Abstande der Zink- und der Platinplatte eine bestimmte Stromstärke J an.

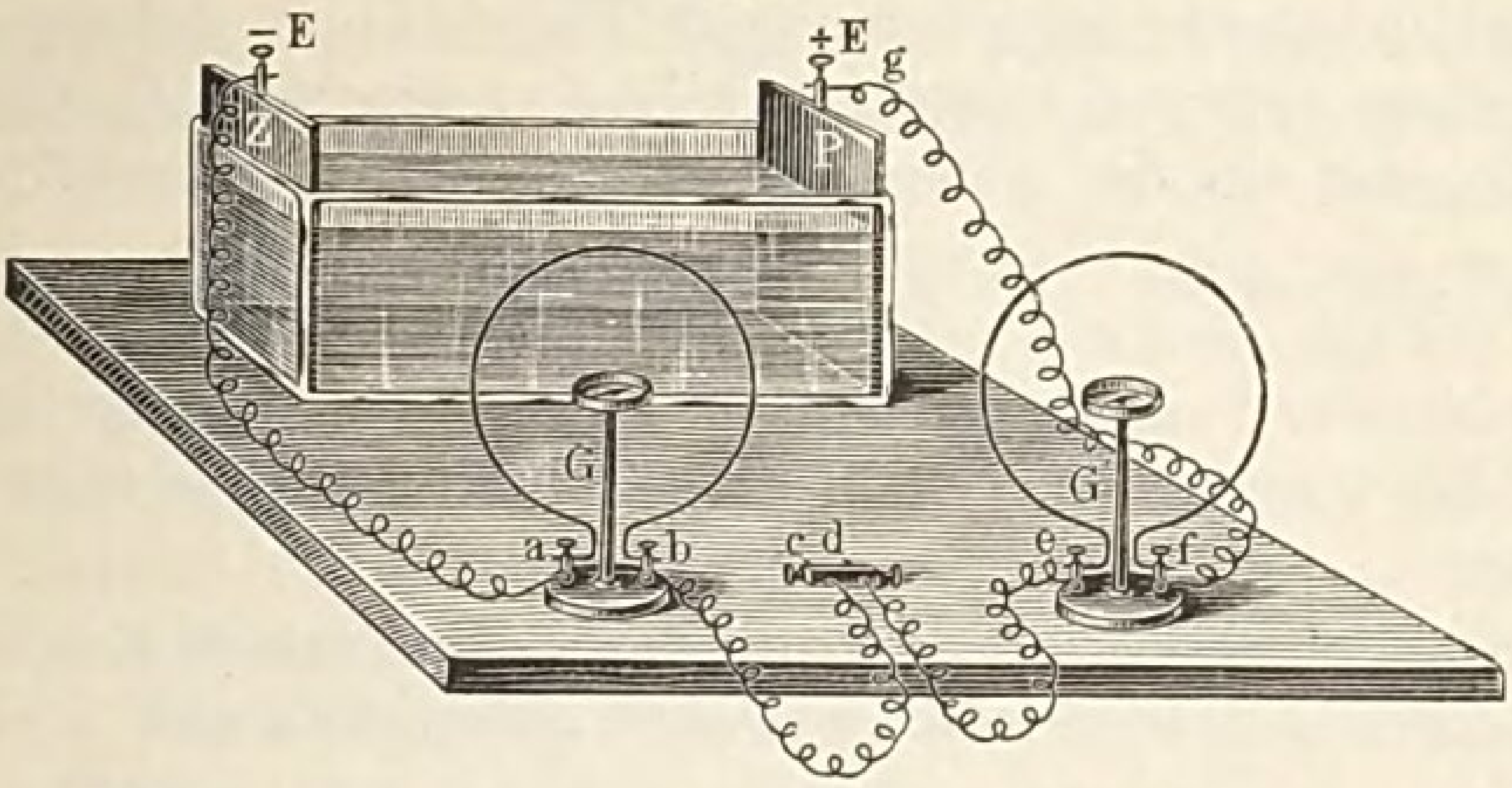
Ein erster Versuch ergiebt nun, dass eine Vertauschung der Leitungsdrähte $- Ea$ und $+ Eb$ durch längere Drähte gleichen Querschnitts und Materiales den Strom schwächt, dass dagegen die Stromintensität zunimmt, wenn man diese Drähte verkürzt. Wir schliessen daraus, dass der metallische Schliessungskreis dem Strom einen um so grösseren Widerstand darbietet, je länger derselbe unter übrigens gleichen Umständen ist.

Ein zweiter Versuch lehrt uns, dass dasselbe bei dem flüssigen Leiter zwischen Z und P der Fall ist, denn eine Vergrösserung der Plattenentfernung vermindert auffällig die Stromintensität.

Dritter Versuch. Um quantitativ zu ermitteln, welchen Einfluss die Vermehrung des Widerstandes auf die Stromstärke hat, wollen wir nun den Widerstand genau verdoppeln. Zu diesem Zwecke nehmen wir drei Veränderungen vor: Wir verdoppeln den Abstand zwischen Z und P, wir verdoppeln die Drahtleitungen und wir schalten noch ein dem Galvanometer G ganz gleiches G' ein (Fig. 356). Indem wir so einzeln

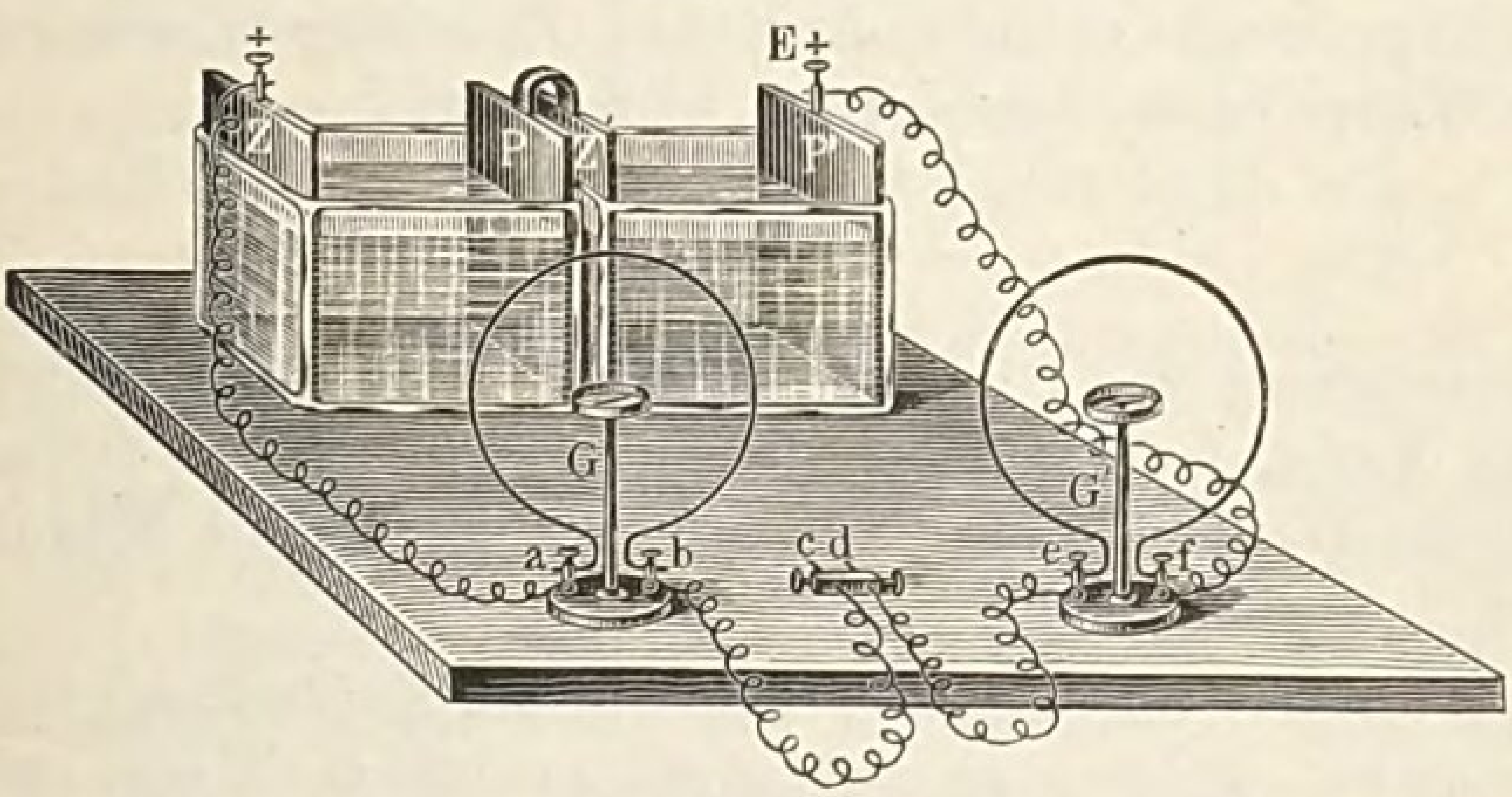
die Widerstände des flüssigen Leiters, des Drahtes und des Galvanometers verdoppelt haben, erhalten wir auch einen doppelt so grossen Gesammtwiderstand. Die Stromstärke zeigt sich jetzt halb so gross $= \frac{J}{2}$, die Galvanometer zeigen nämlich beide solche Ablenkungen, welche der halben Tangente des früheren Ablenkungswinkels entsprechen*).

Fig. 356.



Vierter Versuch. Wir suchen nun ein Stück Draht von derselben Gattung wie der andere verwendete und von solcher Länge, dass derselbe, an Stelle des Galvanometers G' zwischen e und f eingeschaltet, die Ablenkung in G nicht ändert. Wir wissen dann, dass dieses Draht-

Fig. 357.



stück denselben Widerstand darbietet, wie das Galvanometer G' und dass das ganze Drahtstück von d bis $+E$ dann die Hälfte des Widerstandes des ganzen festen Schliessungskreises von $-E$ bis $+E$ ausmacht. Wir sind dann im Stande, den Widerstand der festen Leitung und gleichzeitig den der Flüssigkeit auf einen bestimmten Bruchtheil zu reduciren und so dem Gesammtwiderstande eine Reihe bekannter Werthe zu ertheilen. Durch Messung der gleichzeitigen Stromstärken gelangen wir zu dem Erfahrungssatze: Die Stromstärke ist verkehrt proportional dem Gesammtwiderstande.

*) Die Galvanometer müssen hinreichend von einander entfernt sein, damit sich ihre Nadeln nicht merklich beeinflussen.

Fünfter Versuch. Bisher blieb die elektromotorische Kraft unverändert. (Von den Schwankungen derselben während der Messungen sehen wir ab, da man sie durch Wiederholen des Versuches eliminiren kann.) Wir verdoppeln nun die elektromotorische Kraft, indem wir statt des einen Troges zwei Tröge anwenden, deren jeder ein gleiches Element enthält und dieselben hinter einander einschalten (Fig. 357, a. v. S.). Die Abstände ZP und $Z'P'$ wählen wir so, dass die Summe derselben gleich dem früheren Abstande beim Versuche 3 (Fig. 356) ist. Schalten wir nun auch denselben festen Schliessungskreis ein, wie beim 3. Versuche, so ergiebt sich jetzt aus der Ablenkung eine doppelt so grosse Stromstärke als damals, also $= 2 \cdot \frac{J}{2} = J$. Sowohl elektromotorische Kraft, als Gesammtwiderstand sind hier doppelt so gross, als bei der Anordnung Fig 355, die Stromstärke ist aber dieselbe. Wir gelangen also zu dem Satze:

Die Stromstärke ist der elektromotorischen Kraft direct, dem Gesammtwiderstande verkehrt proportional.

Bezeichnen wir die Stromstärke mit J, den Gesammtwiderstand mit R, die elektromotorische Kraft mit E, so ist somit

$$J = k\,\frac{E}{R},$$

wobei k einen constanten Factor bedeutet, dessen Betrag von den Einheiten abhängt, nach welchen J, E und R gemessen werden. Wählt man diese Einheiten so, dass $k = 1$ wird, so gilt

$$J = \frac{E}{R}.$$

Dieses Gesetz wurde von Ohm entdeckt und nach ihm benannt. („Die galvanische Kette, mathematisch behandelt von G. S. Ohm, Berlin 1827"); es fand jedoch erst viel später die allgemeine Würdigung, die es verdient.

Auch Pouillet machte Anspruch auf die Entdeckung des Gesetzes der Stromstärke, welches er auf experimentellem Wege aufgefunden, während Ohm seine Resultate aus theoretischen Betrachtungen abgeleitet hat, auf die wir später zurückkommen werden. Wenn man auch zugiebt, was sehr leicht möglich ist, dass beide Gelehrte ganz unabhängig von einander und auf ganz verschiedenen Wegen dasselbe Gesetz fanden, so muss man doch unbedingt Ohm die Priorität zugestehen, indem die Publication seines Werkes älter ist, als die der Pouillet'schen Versuche

Was die experimentelle Bestätigung des Ohm'schen Gesetzes betrifft, so hatte man anfänglich mit grossen Schwierigkeiten zu kämpfen, indem es einestheils an bequemen und sicheren Mitteln zur Messung der Stromstärke, andererseits auch an Rheomotoren fehlte, welche hinlänglich kräftige und doch constante Ströme zu liefern im Stande waren.

Die oben beschriebenen Versuche sind als Vorleseversuche geeignet, das Ohm'sche Gesetz abzuleiten, entbehren aber desjenigen Grades der Genauigkeit, welcher zur Bestätigung des Ohm'schen Gesetzes erforderlich ist. Bevor wir dazu taugliche Methoden kennen lernen, müssen wir zuvor über die Abhängigkeit des Leitungswiderstandes linearer Leiter vom Querschnitt und Materiale ins Reine kommen.

Leitungswiderstand linearer Stromleiter; willkürliche Widerstandseinheiten von Jacobi und Siemens. 125 Unter linearen Leitern wollen wir solche verstehen, deren senkrecht auf die Stromrichtung gerichteter Querschnitt constant bleibt, wie es bei Drähten, Stäben und auch bei Flüssigkeitssäulen meistens der Fall ist. Der Widerstand eines solchen Leiters hängt dann ab 1. von der Länge, 2. vom Flächenraum des Querschnitts und 3. von der materiellen Beschaffenheit des Leiters, ist dagegen unabhängig von der Form des Leiters (d. h. davon, ob derselbe gerade gestreckt oder gebogen ist), von der Gestalt des Querschnittes und der Beschaffenheit seiner Oberfläche.

Dass der Widerstand eines Leiters unter sonst gleichen Umständen seiner Länge proportional ist, versteht sich wohl von selbst und wurde dies bei den in §. 124 beschriebenen Versuchen vorausgesetzt.

Um die Abhängigkeit vom Querschnitt zu prüfen, bedienen wir uns eines Apparates, wie in Fig. 356, Seite 413, wobei wir jedoch die zweite Tangentenbussole G' ausschalten und dafür die Drahtenden e und f in zwei Quecksilbernäpfe eintauchen. Wir verbinden hierauf diese Quecksilbernäpfe durch ein Stück Kupferdraht von 1 mm Dicke und 1 m Länge, dessen Widerstand wir $= r$ setzen wollen. Das Galvanometer G zeigt dabei irgend einen Ausschlagswinkel α. Nun verdoppeln wir den Kupferdraht, indem wir zwei 1 mm dicke Drahtstücke von 1 m Länge neben einander legen und deren Enden in die Näpfe tauchen. Sofort steigt die Stromstärke, was wir an der Vergrösserung des Ausschlagswinkels α erkennen. Der Widerstand hat also abgenommen, er ist statt $= r$ nur mehr $= r'$. Ersetzen wir aber nun die beiden je 1 m langen Drähte durch zwei ebenso starke, aber 2 m lange Drähte, so geht die Galvanometernadel wieder auf α zurück. Der doppelte Draht von doppelter Länge bietet also denselben Widerstand r, wie der einfache Draht. Da nun durch die Verlängerung der Drähte aufs Doppelte der Widerstand verdoppelt wird, so ist

$$2r' = r, \; r' = \frac{r}{2},$$

d. h. dadurch, dass wir einen Draht doppelt legen, vermindern wir den Leitungswiderstand auf die Hälfte. Dasselbe würden wir finden, wenn wir statt den Draht doppelt zu nehmen, einen dickeren Draht von doppeltem Querschnitte nehmen würden. Ersetzen wir dagegen den

Draht von 1 mm Dicke durch einen solchen von 2 mm Dicke, so müssen wir denselben 4 mal so lang nehmen, damit er gleichen Widerstand darbiete; sein Querschnitt ist aber auch 4 mal so gross. Ganz allgemein können wir also sagen, dass ein Drahtstück den gleichen Widerstand behält, wenn wir Länge und Querschnitt im gleichen Verhältnisse vergrössern oder verkleinern. Es hängt demnach der Widerstand von dem Verhältniss $\frac{l}{q}$ ab und ist diesem proportional, wenn wir mit l die Länge, mit q den Querschnitt bezeichnen.

Dasselbe gilt von den flüssigen Leitern. Ersetzen wir die Platten Z und P durch solche von halb so grosser Oberfläche oder füllen den Trog nur bis zur halben Höhe der Platten und nähern dieselben zugleich auf die halbe Distanz, so bleibt die Stromstärke unverändert, weil der Quotient $\frac{l}{q}$ derselbe bleibt.

Um den Einfluss der materiellen Beschaffenheit des Leiters auf dessen Widerstand zu untersuchen, können wir folgende Versuche anstellen. In den Schliessungskreis eines constanten Elementes schalten wir eine Tangentenbussole und ein Stück Kupferdraht von 1 m Länge, dessen Enden durch Quecksilbernäpfe mit der übrigen Leitung verbunden sind. Wir beobachten den Nadelausschlag; hierauf vertauschen wir den Kupferdraht mit einem gleich langen und gleich dicken Draht aus Messing, Eisen, Neusilber u. s. f. Sofort ändert sich der Nadelausschlag, der Strom wird schwächer, woraus wir schliessen, dass die Widerstände dieser Metalle grösser sind als jener des Kupfers. Um das Verhältniss derselben zu ermitteln, verkürzen wir nun die Drähte aus Messing, Eisen, Neusilber so weit, dass durch ihre Einschaltung an Stelle des Kupferdrahtes der Nadelausschlag, also auch die Stromstärke nicht geändert wird. Offenbar haben dann alle diese Drahtstücke gleichen Widerstand wie das Kupferdrahtstück. Sind diese Längen l_1, l_2, l_3, so erhalten wir die Widerstände dieser Drähte per Meter im Verhältniss zum Kupfer, dessen Widerstand wir dabei $= 1$ setzen, gleich den Quotienten $\frac{1}{l_1}, \frac{1}{l_2}, \frac{1}{l_3}$.

So z. B. hat schon Ohm gefunden, dass die Widerstände gleich langer und gleich dicker Drahtstücke von Kupfer, Zink und Eisen sich verhalten wie 1,00 : 3,00 : 5,72.

Der Widerstand r eines Leiters von der Länge l und dem constanten Querschnitte q ist demnach im Allgemeinen gegeben durch den Ausdruck:

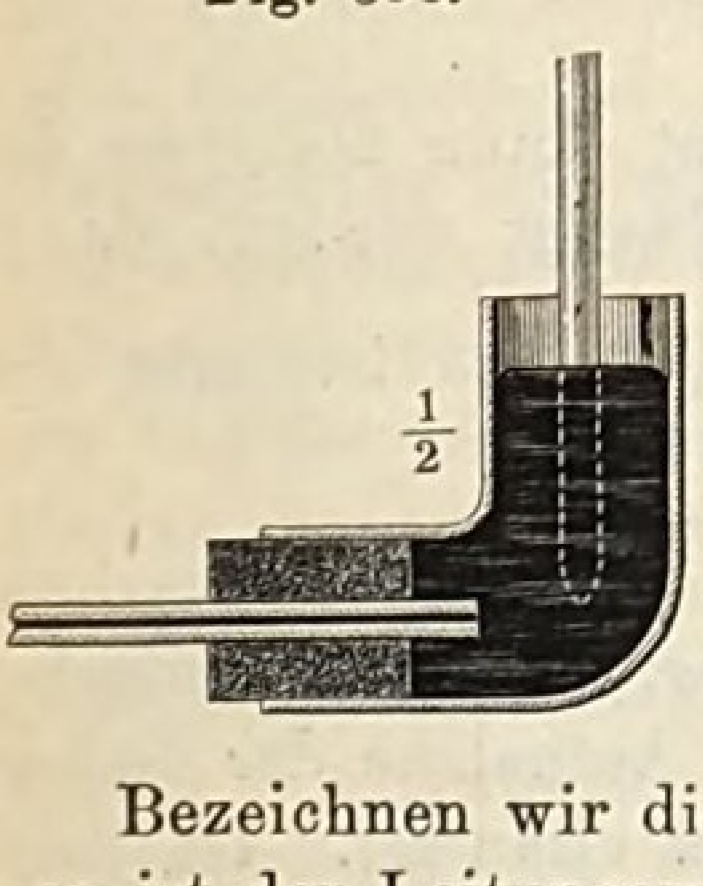
$$R = s\,\frac{l}{q},$$

wobei s eine Constante ist, welche der specifische Widerstand des Materials heisst, und deren Werth von den Einheiten abhängt, nach welchen

l, q und R gemessen werden. Als Einheit des Widerstandes hat zuerst Jacobi den Widerstand eines Kupferdrahtes von 1 m Länge und 1 mm Durchmesser vorgeschlagen. Es ergab sich aber bald, dass Widerstandsmaasse, welche nach dieser Definition in verschiedenen Werkstätten angefertigt worden waren, bedeutende Differenzen zeigten, weil der Widerstand der Drähte sehr durch geringen Gehalt an fremden Metallen beeinflusst wird. Jacobi hat deshalb später diesen ersten Vorschlag fallen lassen und einen ganz willkürlich gewählten Kupferdraht (er war 7,62 m lang, 0,667 mm dick und war auf die flachen Schraubenwindungen eines Serpentincylinders aufgewunden), der nur durch Copiren vervielfältigt werden sollte, zum Widerstandsetalon bestimmt. Von diesem Etalon, der zu der obigen Einheit in gar keinem Zusammenhange steht, sandte Jacobi selbst mehrere Copien an verschiedene Physiker, in der Meinung, dass sie sich dieses Etalons als elektrischer Widerstandseinheit bedienen sollten. Andere Copien dieses Etalons sind von Leyser in Leipzig angefertigt worden. Es zeigte sich aber bald, dass verschiedene Copien dieses Etalons bis zu 8 Procent von einander differirten und dass selbst der Leitungswiderstand eines und desselben Exemplars nicht unverändert blieb. Ein brauchbares Maass soll aber vor allem die Eigenschaft der Unveränderlichkeit und der Reproductionsfähigkeit besitzen.

Diese Bedingungen erfüllt die Siemens'sche Quecksilbereinheit. Siemens schlug nämlich vor, eine Quecksilbersäule von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt bei 0° C. zur Widerstandseinheit zu nehmen. Diese Einheit hat den grossen Vorzug, dass man das Quecksilber stets in genügender Reinheit erhalten kann, dass es unabhängig ist von den Verschiedenheiten der Molecularzustände, welche feste Körper zeigen, und dass der Leitungswiderstand des Quecksilbers sich sehr wenig ändert, wenn die Temperatur steigt.

Fig. 358.



Um eine Quecksilbersäule herzustellen, bringt man dasselbe in ein möglichst cylindrisches Glasrohr, welches bei horizontaler Lage auf jeder Seite in ein Quecksilbergefäss einmündet (Fig. 358). In diese Quecksilbergefässe werden die dicken kupfernen Zuleitungsdrähte eingetaucht.

Bezeichnen wir die Länge des Rohres mit l, seinen Halbmesser mit r, so ist der Leitungswiderstand der darin enthaltenen Quecksilbersäule

$$R = \frac{l}{\pi r^2},$$

wenn l in Metern, r in Millimetern ausgedrückt ist, oder

$$R = \frac{0{,}001\, l}{\pi r^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

wenn r und l in Millimetern ausgedrückt sind.

Der Cubikinhalt der Röhre ist aber $V = \pi r^2 l$, also das in Milligrammen ausgedrückte Gewicht des darin enthaltenen Quecksilbers $G = \pi r^2 l \sigma$, wenn σ das specifische Gewicht des Quecksilbers bezeichnet und r und l in Millimetern ausgedrückt sind, daraus aber folgt

$$r^2 = \frac{G}{\pi l \sigma}$$

und wenn man diesen Werth von r^2 in Gleichung 1) setzt

$$R = \frac{l^2 \sigma}{1000\, G} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

wonach man leicht den Leitungswiderstand R der Quecksilbersäule berechnen kann, wenn man die Länge l des Glasrohres gemessen und das Gewicht G des darin enthaltenen Quecksilbers bestimmt hat.

Nun aber ist wohl kaum eine Glasröhre zu finden, welche vollkommen cylindrisch ist; die Gleichung 2) bedarf deshalb noch einer Correction. Wie Siemens gezeigt hat*) ist der genaue Werth des fraglichen Leitungswiderstandes

$$R = \frac{l^2 \sigma}{1000\, G} \cdot \frac{1 + \sqrt{a} + \frac{1}{\sqrt{a}}}{3} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

wenn a die Zahl ist, welche angiebt, wie viel mal der grösste Querschnitt der Röhre grösser ist als der kleinste. Um die Zahl a zu erhalten, lässt man einen Quecksilberfaden nach und nach von einem Ende der Röhre zum andern laufen und misst die Länge, die er an verschiedenen Stellen der Röhre einnimmt. Ist λ die grösste und λ' die kleinste Länge des Quecksilberfadens, so ist

$$a = \frac{\lambda}{\lambda'}.$$

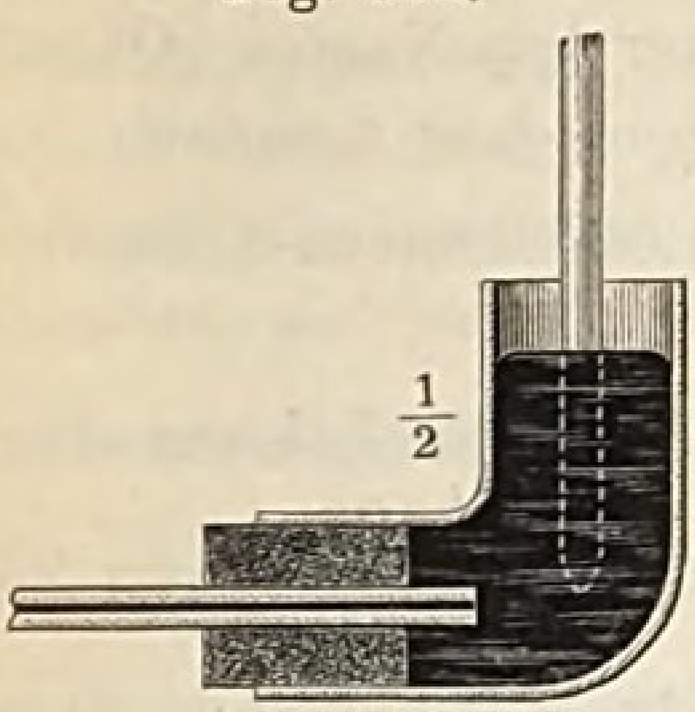
Wo es nicht auf sehr grosse Genauigkeit ankommt, kann übrigens der Correctionsfactor der Gleichung 3) ganz vernachlässigt werden, da er für ziemlich stark conische Röhren, für welche $\frac{\lambda}{\lambda'} = 1{,}3$ ist, erst den Werth 1,006 erreicht.

Jedes Ende des Glasrohres führte Siemens mittelst Kautschukverschlusses in ein weiteres, kurzes und rechtwinkelig umgebogenes Glasrohr ein, welches mit Quecksilber gefüllt zur Aufnahme der dicken, kupfernen Zuleitungsdrähte dient, wie es Fig. 359 erläutert. Ist diese Vorrichtung in den Schliessungsbogen des Rheomotors eingeschaltet, so besteht der Widerstand, welchen sie dem Strom bietet, aus dem Widerstand des Quecksilberfadens im Glasrohr und den Ausbreitungswiderstand, welchen der Strom in jedem der beiden Zuleitungsgefässe zu überwinden hat, um von der Mündung des Rohres zu dem kupfernen Zuleitungsdraht zu gelangen. Wie Siemens gezeigt hat, ist die Summe

*) Pogg. Annal. CX.

der Ausbreitungswiderstände in beiden Zuleitungsgefässen gleich dem Widerstand einer Quecksilbersäule, welche bei gleichem Querschnitt mit dem engen Glasrohr so lang ist wie der Radius desselben. Wo es also nicht auf grosse Genauigkeit ankommt, kann dieser Ausbreitungswiderstand ganz vernachlässigt werden.

Fig. 359.



Die Siemens'sche Widerstandseinheit, welche abgekürzt durch S. E. ausgedrückt wird, hat den Physikern die besten Dienste geleistet, sie hat nur den theoretischen Nachtheil, dass sie nicht in einfacher Beziehung zum absoluten Maasssysteme steht, nach welchem alle Messungen auf Centimeter, Gramm und Secunde bezogen werden. Ein solches absolutes Maass des Widerstandes verdanken wir W. Weber.

W. Weber's absolute Widerstandseinheit, praktische Widerstandseinheit (Ohm). Die von W. Weber aufgestellte absolute Widerstandseinheit steht auf zweierlei Weise mit den Fundamentaleinheiten der Länge, Maasse und Zeit in Zusammenhang. Einmal können wir diesen Zusammenhang mittelst der Wärmewirkungen des elektrischen Stromes herstellen, dann aber auch — und dies war die ursprüngliche Ableitung — gelangen wir zur absoluten Widerstandseinheit durch die später zu besprechenden Inductionsgesetze. Wir wollen zunächst den ersteren Weg einschlagen. 126

Wie wir später hören werden, ist die von einem Strome in einem Leiter per Secunde entwickelte Wärmemenge nach einem von Joule entdeckten Gesetze direct proportional dem Widerstande und dem Quadrat der Stromstärke. Die Wärmemenge wird gewöhnlich gemessen nach Grammcalorien, d. i. nach Wärmeeinheiten, deren jede $^1/_{100}$ der Wärmemenge ist, welche 1 g Wasser von 0^0 auf 100^0 bringt. Eine solche Grammcalorie ist äquivalent mit 0,43 mkg Arbeit, also auch äquivalent mit 0,43 . 100 . 1000 . 981 Erg's = 42 Millionen Erg's. Indem wir uns die vom Strome entwickelte Wärmemenge in Erg's umgerechnet denken, können wir also auch sagen: Ein Strom von der Stärke Eins (C. Gr. S.) bringt per Secunde in einem Leiter eine dem Widerstande desselben proportionale Menge von absoluten Arbeitseinheiten oder Erg's hervor. Als absolute Einheit des Widerstandes gilt nun jener Widerstand, in welchem die absolute Stromeinheit in der Zeiteinheit eine absolute Arbeitseinheit entwickelt.

Wählen wir also ein Stück Draht so lang, dass der Strom 1 (C. Gr. S.) = 10 Amp. per Secunde in demselben 1 Erg oder die ihm äquivalente Wärmemenge $= \frac{1}{42\,000\,000}$ Grammcalorien entwickelt, so gilt dessen Widerstand als Eins (C. Gr. S.). Diese Maasseinheit ist jedoch für die Praxis unbequem klein.

Sorgfältige Messungen haben ergeben, dass 1000 Millionen solcher absoluter Widerstandseinheiten gleichkommen dem Widerstande einer Quecksilbersäule von 1 qmm Querschnitt und 1,06 m Länge bei 0^0 C.*). Der Pariser elektrische Congress 1884 setzte daher fest, dass Tausend Millionen obiger absoluter Widerstandseinheiten unter dem Namen „Ohm" als praktische Widerstandseinheit zu gelten habe und dass demnach

$$10^9 \text{ Widerstandseinheit (C. Gr. S.)} = 1 \text{ Ohm} = 1{,}06 \text{ Siemens-Einheit}$$

zu setzen sei.

Ein Ohm ist also derjenige Widerstand, in welchem der Strom Eins (C. Gr. S.) per Secunde 10^9 Erg oder $\frac{10^9}{42\,000\,000} = 24$ Grammcalorien entwickelt. Da die entwickelte Wärmemenge dem Quadrate der Stromstärke proportional ist, und 1 Amp. $= {}^1/_{10}$ Stromeinheit (C. Gr. S.) ist, so entwickelt der Strom 1 Amp. in dem Widerstand 1 Ohm per Secunde eine Arbeit $= 10^7$ Erg, äquivalent mit 0.24 Grammcalorien.

Der andere Weg, den W. Weber eingeschlagen hat, um zur Definition der absoluten Widerstandseinheit zu gelangen und welcher zu der nämlichen Einheit führt, liegt uns hier zwar ferner, doch woller wir ihn, des Zusammenhanges wegen, wenigstens in der Hauptsache andeuten.

Wenn in einem magnetischen Felde von der Intensität Eins (C. Gr. S.) ein Leiter von 1 cm Länge mit der Geschwindigkeit von 1 cm per Secunde senkrecht durch die Kraftlinien bewegt wird, so entsteht in ihm eine elektromotorische Kraft, welche wir im absoluten Maasse = Eins (C. Gr. S.) setzen. Derjenige Widerstand eines Leiters, in welchem durch eine solche elektromotorische Kraft Eins (C. Gr. S.) ein Strom = Eins (C. Gr. S.) entsteht, gilt als absolute Widerstandseinheit (C. Gr. S.) und der 10^9fache Betrag derselben ist also wiederum identisch mit 1 Ohm.

Als Abkürzung für Ohm (als Widerstand) wird oft der Buchstabe Ω gebraucht.

127 **Specifischer Widerstand, Leitungsvermögen.** Widerstandstabellen. Im §. 125 haben wir für den Widerstand R eines Leiters von der Länge l und dem Querschnitte q den Ausdruck

$$R = s\,\frac{l}{q}$$

gegeben, worin s eine unter dem Namen specifischer Widerstand bekannte Constante des Materials ist, deren Zahlenwerth ausserdem von den Einheiten abhängt, nach welchen R, l und q gemessen werden. Der

*) Die allerneuesten Bestimmungen von F. Kohlrausch (Sitzungsber. d. K. bayer. Akad. 1888, S. 3) haben im Mittel aus vielen Versuchen den genaueren Werth 1,0632 ergeben.

reciproke Werth von s, also $\lambda = \frac{1}{s}$, heisst das specifische Leitungsvermögen.

Um diese Grössen ebenfalls nach dem absoluten (C. Gr. S.)-System zu messen, muss man consequent R nach Widerstandseinheiten (C. Gr. S.), l nach Centimetern, q nach Quadratcentimetern messen. Hierdurch bekommt der specifische Widerstand s die Bedeutung desjenigen Widerstandes, welchen ein Würfel des Materials von 1 cbcm Grösse dem Durchgange der Elektricität von einer Fläche zur gegenüberstehenden darbietet.

Leitungswiderstand bei 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt			Leitungsvermögen oder Länge eines Ohm's bei 1 qmm Quersch.
Materiale	Siemens-Einh.	Ohm	Meter
Quecksilber bei 0°	1,000	0,944	1,06
Wismuth	1,33	1,26	0,8
Antimon	0,36	0,34	2,9
Neusilber	0,212	0,20	5,0
Blei	0,199	0,188	5,3
Zinn	0,134	0,127	7,9
Eisen	0,099	0,093	10,8
Platin	0,092	0,087	11,5
Zink	0,057	0,054	18,5
Messing	0,051	0,048	20,9
Gold	0,021	0,019	52,6
Kupfer	0,016	0,015	66,7
Silber	0,015	0,014	71,4
Gaskohle	40 bis 120	38 bis 113	0,025 bis 0,008
Schwefelsäure von 30,4 Proc.	14 463	13 653	0,00006914
Zinksulfatlösung 23,7 Proc.	221 239	208 850	0,00000452

Denn setzt man in der Gleichung $s = R\frac{q}{l}$ die Grössen $q = 1$ und $l = 1$, so wird $s = R$.

Ebenso findet man $\lambda = \frac{1}{s} = \frac{l}{qR}$, was man in die Worte übersetzen kann: Das specifische Leitungsvermögen ist gleich der Länge des Leiters, dem beim Querschnitt 1 qcm der Widerstand Eins (C. Gr. S.) zukommt. So ist z. B. für Kupfer ungefähr $s = 1500$, $\lambda = 0{,}000667$. Diese Zahlen gelten für das (C. Gr. S.)-System.

Gewöhnlich wird aber der Widerstand R in Ohm, l in Metern, q in Quadratmillimetern gemessen. Es wird dann $s = 0{,}015$, $\lambda = 66{,}7$. Diese Zahlen sagen: Der Leitungswiderstand von 1 m Kupferdraht von 1 qmm Querschnitt beträgt 0,015 Ohm, die Länge eines Kupferdrahtes von 1 qmm Querschnitt und 1 Ohm Widerstand beträgt 66,7 m. Diese Zahlen sind aus den vorigen durch Division, beziehungsweise Multiplication mit 10^5 zu erhalten.

Die Tabelle (a. v. S.) enthält in den beiden letzten Columnen diese Zahlenwerthe für die wichtigeren Leiter. Daneben ist auch noch der Leitungswiderstand in Siemenseinheiten angegeben.

Die Angaben dieser Tabelle, obwohl den verlässlichsten Messungen entnommen, haben vielfach nur angenäherten Werth. Die für ein und dasselbe Material gefundenen Zahlen verschiedener Beobachter differiren oft sehr bedeutend, was in dem verschiedenen Grade der chemischen Reinheit der Metalle, in der verschiedenen physikalischen Beschaffenheit derselben — weiche Drähte leiten meist besser als gehärtete — seinen Grund hat. Besonders stark weichen die einzelnen Kupfersorten unter einander ab*), deren Leitungsvermögen durch einen Gehalt von Kupferoxydul, sowie durch geringe Beimengungen von Arsen etc. ausserordentlich stark beeinträchtigt sein kann. Aus diesem Grunde wurden, wie erwähnt, die ursprünglichen Jacobi'schen Einheiten ganz aufgegeben. Nur um ältere Angaben, so weit möglich, umrechnen zu können, führen wir hier noch folgende Tabelle auf:

Ohm (Pariser Congress) $= 10^9$ Einheiten (C. Gr. S.)	Brit. Assoc. E.	Siemens-Einh. $\frac{\text{Meter}}{\text{Q.-Millim.}}$ Hg	Jacobi $\frac{\text{Meter}}{\text{Millim.}}$ Cu	Jacobi Etalon
1	1,011	1,060	45,596	1,602
0,989	1	1,048	—	—
0,944	0,954	1	43,015	1,511

Die in der zweiten Columne dieser Tabelle aufgeführte Widerstandseinheit ist die von der Brit. Association angenommene auf Grund früherer weniger genauer Messungen etwas zu klein gerathene praktische Widerstandseinheit, welche aber in der Literatur oft vorkommt. Uebrigens ist auch die Pariser Congresseinheit mit der theoretischen Einheit 10^9 (C. Gr. S.) nicht ganz identisch, da die Bestimmung 10^9 (C. Gr. S.) $= 1{,}060$ S. E., wie wir S. 420 Anmerkung mitgetheilt haben, noch eine kleine Correctur erfahren hat.

*) A. v. Waltenhofen, Pogg. Ann. **133**, S. 466; Centralblatt f. Elektrotechnik, Bd. 6, S. 228.

Leitungswiderstand der Legirungen. Ueber die Leitungsfähigkeit der Metalllegirungen hat Matthiessen eine sehr umfangreiche Untersuchung angestellt. Er fand, dass die Metalle hinsichtlich des Verhaltens ihrer Legirungen in zwei Classen getheilt werden können, nämlich: 128

A. diejenigen Metalle, welche, wenn mit einander legirt, die Elektricität in dem Verhältniss ihrer relativen Volumina leiten;

B. diejenigen Metalle, welche, legirt mit einem Metall der Classe A oder mit einander legirt, die Elektricität nicht im Verhältniss ihrer Volumina, sondern stets schlechter leiten.

Zur Classe A gehören: Blei, Zinn, Cadmium und Zink.

Zur Classe B gehören: Wismuth, Quecksilber, Antimon, Eisen, Aluminium, Gold, Kupfer, Silber etc.

Als Beispiel des Verhaltens der Metalle der ersten Classe mögen die Zahlen der folgenden kleinen Tabelle dienen:

	Leitungsfähigkeit beob.	Leitungsfähigkeit berech.
100 Zink legirt mit 0 Vol.-Proc. Zinn . . .	27,4	27,4
69,6 „ „ „ 30,4 „ „ . . .	22,3	22,5
12,5 „ „ „ 87,5 „ „ . . .	13,2	13,4
0 „ „ „ 100 „ „ . . .	11,4	11,4

Die beobachtete Leitungsfähigkeit der Legirung ist also in der That sehr nahe gleich der berechneten.

Als Beispiel des Verhaltens, welches Legirungen zeigen, die aus einem Metall der zweiten Classe mit einem Metall der ersten bestehen, mag folgende Tabelle dienen:

	Leitungsfähigkeit beob.	Leitungsfähigkeit berech.
100 Silber legirt mit 0 Vol.-Proc Zinn . . .	100	100
98 „ „ „ 2 „ „ . . .	23,0	98,2
39 „ „ „ 61 „ „ . . .	14,3	46,3
10 „ „ „ 90 „ „ . . .	11,5	20,1
0 „ „ „ 100 „ „ . . .	11,4	11,4

Die Veränderung, welche die Leitungsfähigkeit des Silbers durch einen Zusatz von Zinn erleidet, wird durch die unterste Curve der Fig 360 (a. f. S.) anschaulich gemacht. Die Abscissen sind proportional den Volumprocenten des zugesetzten Zinns, die Ordinaten sind proportional der Leitungsfähigkeit der Legirung aufgetragen.

Man übersieht hier leicht, wie rasch die Leitungsfähigkeit schon bei einem ganz geringen Zusatz von Zinn abnimmt, um dann bei wachsendem Zinngehalt allmälig bis zur Leitungsfähigkeit des reinen Zinns herabzusinken.

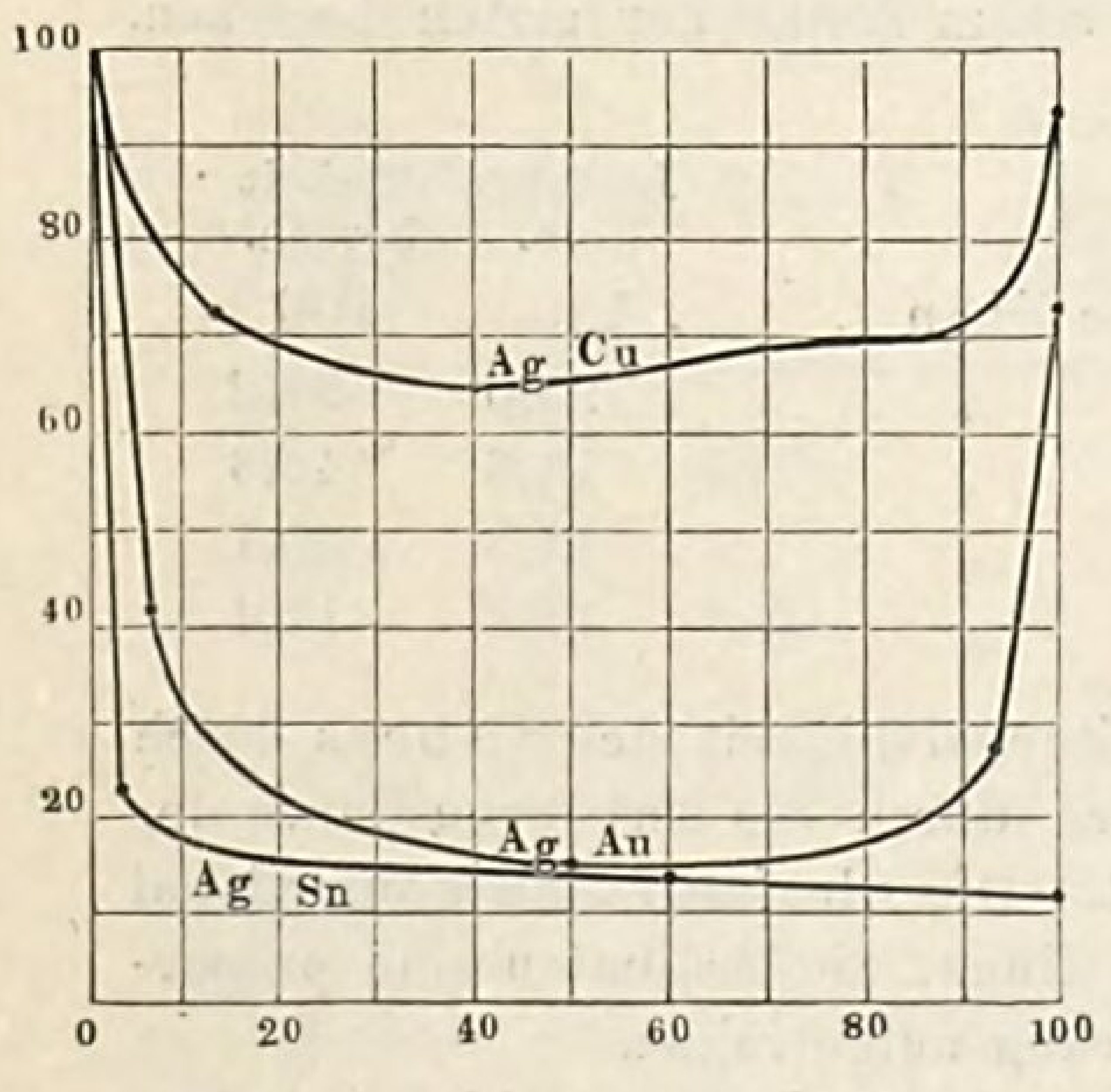
Für die meisten Legirungen von zwei Metallen der zweiten Classe ist es charakteristisch, dass die Leitungsfähigkeit eines jeden schon bei

einem geringen Zusatze des andern bedeutend abnimmt, wie dies z. B. bei den Legirungen von Silber mit Gold und mit Kupfer der Fall ist und wie man aus der folgenden Tabelle ersieht.

	Leitungsfähigkeit beob.	Leitungsfähigkeit berech.
100 Silber legirt mit 0 Vol.-Proc. Gold . . .	100	100
94 " " " 6 " " . . .	41,2	98,4
80 " " " 20 " " . . .	21,0	94,6
50 " " " 50 " " . . .	14,6	86,5
6 " " " 94 " " . . .	26,4	74,5
0 " " " 100 " " . . .	73,0	73,0
100 Silber legirt mit 0 Vol.-Proc. Kupfer . .	100	100
98,0 " " " 2,0 " " . .	83,4	90,9
86,9 " " " 13,1 " " . .	67,5	99,1
61,1 " " " 38,9 " " . .	64,9	97,3
36,7 " " " 63,3 " " . .	68,0	95,7
10,0 " " " 90,0 " " . .	70,0	93,8
2,0 " " " 98,0 " " . .	79,4	93,3
0 " " " 100,0 " " . .	93,0	93,0

In Fig. 360 stellt die mittlere Curve dar, wie die Leitungsfähigkeit einer Legirung von Silber und Gold von ihrer Zusammensetzung abhängt.

Fig. 360.



Ebenso bezieht sich die oberste Curve auf die Legirungen von Silber und Kupfer.

Schon ein Gehalt von ungefähr $2\frac{1}{2}$ Volum-Procenten an Gold bringt die Leitungsfähigkeit des Silbers bis auf die des Goldes herab, bei fernerem Zusatze von Gold sinkt die Leitungsfähigkeit der Legirung rasch unter die Leitungsfähigkeit des Goldes, um für einen Gehalt von 50 Volum-Procenten Gold ein Minimum zu erreichen. Bei fernerer Zunahme des Goldgehaltes steigt dann die Leitungsfähigkeit der Legirung wieder, und zwar erst langsam, dann aber von ungefähr 94 Procent Goldgehalt an sehr rasch.

Ein ähnliches Verhalten zeigen die Legirungen von Silber und Kupfer, wie man sowohl aus obiger Tabelle, als auch aus der obersten Curve der Fig. 360 ersieht, nur sinkt hier das Minimum der Leitungsfähigkeit bei weitem nicht so tief, wie bei den Legirungen aus Silber und Gold.

Für die Elektrotechnik ist insbesondere die unter dem Namen Konstantan bekannte, aus 60 Proc. Kupfer und 40 Proc. Nickel hergestellte Legirung wichtig geworden, weil sie sich durch grossen Leitungswiderstand und sehr geringe Abhängigkeit desselben von der Temperatur auszeichnet und deshalb am besten zur Herstellung von Widerstandsetalons eignet. Zu Telegraphen und Telephonleitungen werden auch Drähte aus Siliciumkupfer und sogenannte Phosphorbronze verwendet. Ersteres hat ungefähr den anderthalbfachen, letztere den dreifachen Widerstand des Kupfers. Der Vortheil dieser Materialien liegt in ihrer grösseren Festigkeit.

Einfluss der Temperatur auf den Leitungswiderstand der Metalle. 129 Der specifische Leitungswiderstand der Metalle ändert sich mit der Temperatur und zwar nimmt er zu, wenn die Temperatur steigt. Es ist dies leicht durch den Versuch nachzuweisen, man braucht nur in den Schliessungsbogen eines constanten Rheomotors, etwa eines Bunsen'schen Bechers, die Tangentenbussole und ausserdem noch einen ungefähr 1 m langen und gegen 1 mm dicken spiralförmig aufgewundenen Platin- oder Eisendraht einzuschalten. Die Tangentenbussole wird eine bestimmte Ablenkung zeigen. Erwärmt man nun den Draht mittelst einer starken Weingeist- oder Gaslampe, so geht die Nadel zurück, ein Beweis, dass der Widerstand des Drahtes zugenommen hat.

Bezeichnet man den specifischen Leitungswiderstand bei 0^0 mit s_0, so findet man denselben bei $t^0: s_t = s_0\,(1 + kt)$, d. h. der Widerstand nimmt proportional mit der Temperatur zu, und zwar für jeden Grad um den Betrag ks_0. Die Constante k nennt man den Temperaturcoëfficienten des Metalles (in Bezug auf seinen Widerstand). Dieser Coëfficient beträgt für die meisten reinen Metalle zwischen 0,0033 und 0,0041, für Quecksilber 0,00090, für Neusilber 0,00024 bis 0,0006, für Kohle ist k ungefähr $= -$ 0,0002 bis 0,0007, d. h. der Widerstand der Kohle nimmt mit der Temperaturerhöhung ab.

Nach Lenz und Matthiessen ist die Zunahme der Leitungsfähigkeit nicht genau der Temperaturzunahme proportional. Für 10 von ihm untersuchte Metalle findet letzterer die Formel

$$s_t = s_0\,(1 - 0{,}0037674\ t + 0{,}00000834\ t^2).$$

Wenn diese Formel auch für höhere Temperaturen noch gültig wäre, so müsste die Leitungsfähigkeit aller Metalle für 226^0 ein Minimum sein und für 452^0 wäre sie wieder gleich der Leitungsfähigkeit bei 0^0.

Es ist dies nicht allein sehr unwahrscheinlich, sondern es steht auch im Widerspruch mit den Resultaten der Versuche, welche über den Leitungswiderstand glühender Drähte gemacht worden sind.

Nach J. Müller's Bestimmungen ist der Leitungswiderstand eines fast weissglühenden Eisendrahtes nahe 11 mal so gross als bei gewöhnlicher Lufttemperatur.

Clausius*) hat darauf aufmerksam gemacht, dass der Temperaturcoëfficient der Metalle nahe so gross ist, wie der Ausdehnungscoëfficient der Gase 0,003667, woraus dann folgen würde, dass der Leitungswiderstand der absoluten Temperatur proportional sei und bei — 273° gleich Null werden müsste. Obwohl sich nun diese Beziehung durch die nachherigen Versuche von Matthiessen und v. Bose**) nicht bestätigt hat, so haben doch Messungen von v. Wroblewski***) ergeben, dass der Widerstand des Kupfers noch rascher sinke als die absolute Temperatur, so dass dieselbe bei den niedrigen Kältegraden, welche man durch Verdampfen von flüssigem Stickstoff erreicht (ungefähr — 200°) schon auf einen sehr geringen Bruchtheil herabsinkt. Wir geben hier eine der von v. Wroblewski mitgetheilten Versuchsreihen wieder, welche er mit einem über 2 m langen Kupferdraht erhalten hat.

Temperatur in Graden Cels.	Widerstand in Siemens-Einheiten	Temperatur-coëfficient
+ 25	19,262	—
0	17,489	0,004056
— 103	9,769	0,004286
— 146	6,738	0,004030
— 193	2,754	0,004847
— 201	1,655	0,007855

Diese Resultate liessen erwarten, dass der Widerstand des Kupfers noch lange vor dem Erreichen des absoluten Nullpunktes der Temperatur sich dem Werthe Null nähert.

Auf die Aenderung des Widerstandes der Metalle in hohen Temperaturen hat Siemens sein Pyrometer gegründet, welches wir an anderer Stelle beschreiben.

130 **Rheostate und Widerstandsetalons.** Um den Leitungswiderstand in dem Schliessungsbogen einer Volta'schen Säule stetig ändern zu können, haben Wheatstone, Jacobi, Poggendorff u. A. Apparate construirt, welche wir Rheostate nennen wollen. Fig. 361 und Fig. 362 stellen eine der zweckmässigsten im Wesentlichen von Wheat-

*) Pogg. Ann. 104, p. 650 (1858).
**) Ebenda 115, p. 391 (1862).
***) Wiedem. Ann. 26, p. 27 (1885).

stone herrührende Form des Rheostats dar, und zwar einen solchen für dickeren Draht. Auf eine Walze von Serpentin oder Marmor ist eine Schraubenlinie ganz flach eingeschnitten und auf diese ein Metalldraht (Kupfer, wenn es sich um geringere, Neusilber, wenn es sich um bedeutendere Widerstände handelt) von $^1/_2$ bis 1 mm Durchmesser aufgewickelt, dessen Ende, auf der rechten Seite in die Masse des Cylinders eintretend, bis zur metallenen Axe desselben fortgeführt und hier aufgelöthet ist.

Gegen diesen Schraubendraht wird nun ein kupfernes Röllchen *r* angedrückt, welches mit einer, der Dicke des Drahtes entsprechenden Rinne versehen ist. Es ist auf einem Metallstab *ab* verschiebbar, welcher an seinen beiden Enden auf starke Federn aufgeschraubt ist, die ihn gegen den Serpentincylinder hin drücken, wie dies aus Fig. 362 deutlicher zu ersehen ist, welche den Apparat von der Seite der Kurbel *h* aus gesehen darstellt.

Fig. 361.

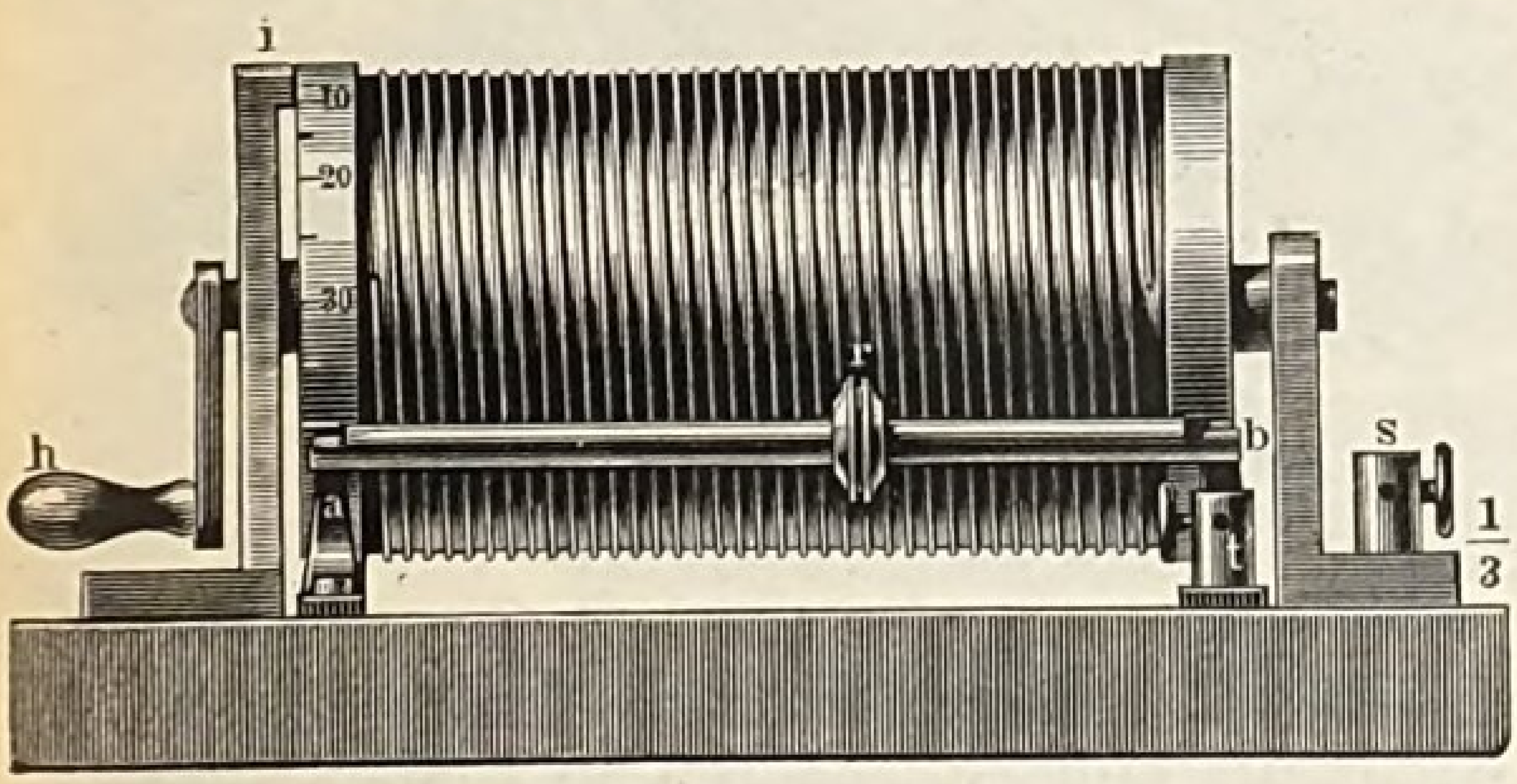
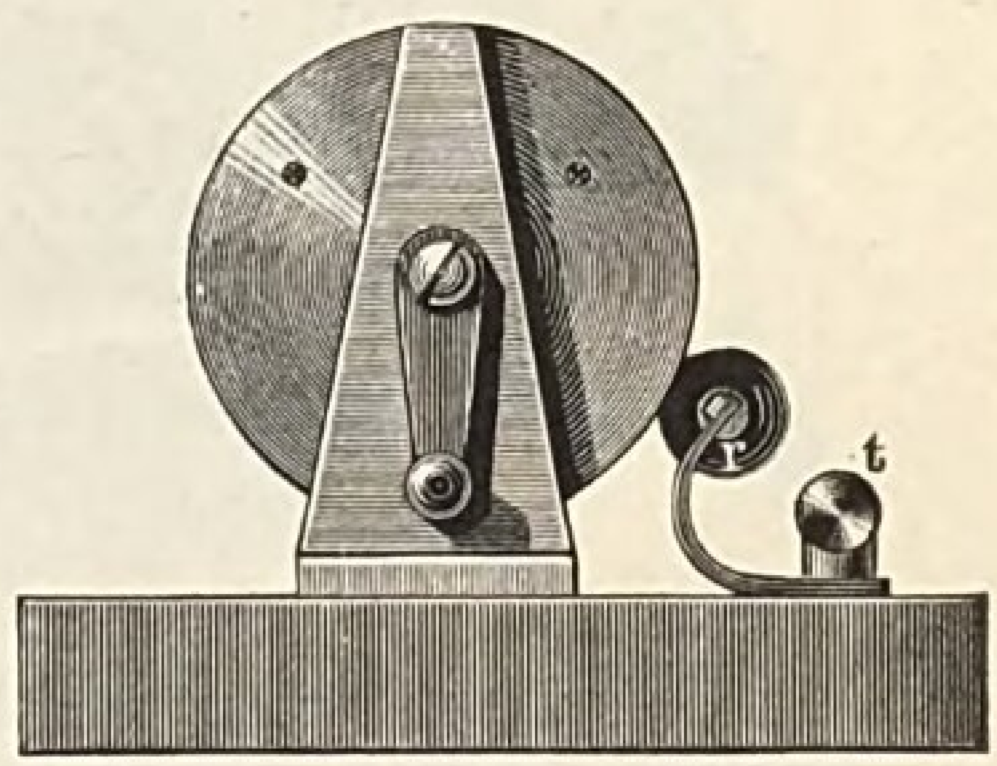


Fig. 362.



Es ist nun klar, dass, wenn die Kurbel *h* gedreht wird, alsdann die Rolle *r*, den Schraubenwindungen des Drahtes folgend, auf dem Stäbchen *ab* nach der einen oder nach der anderen Seite fortgeschoben wird, je nachdem man die Kurbel nach der Rechten oder nach der Linken dreht.

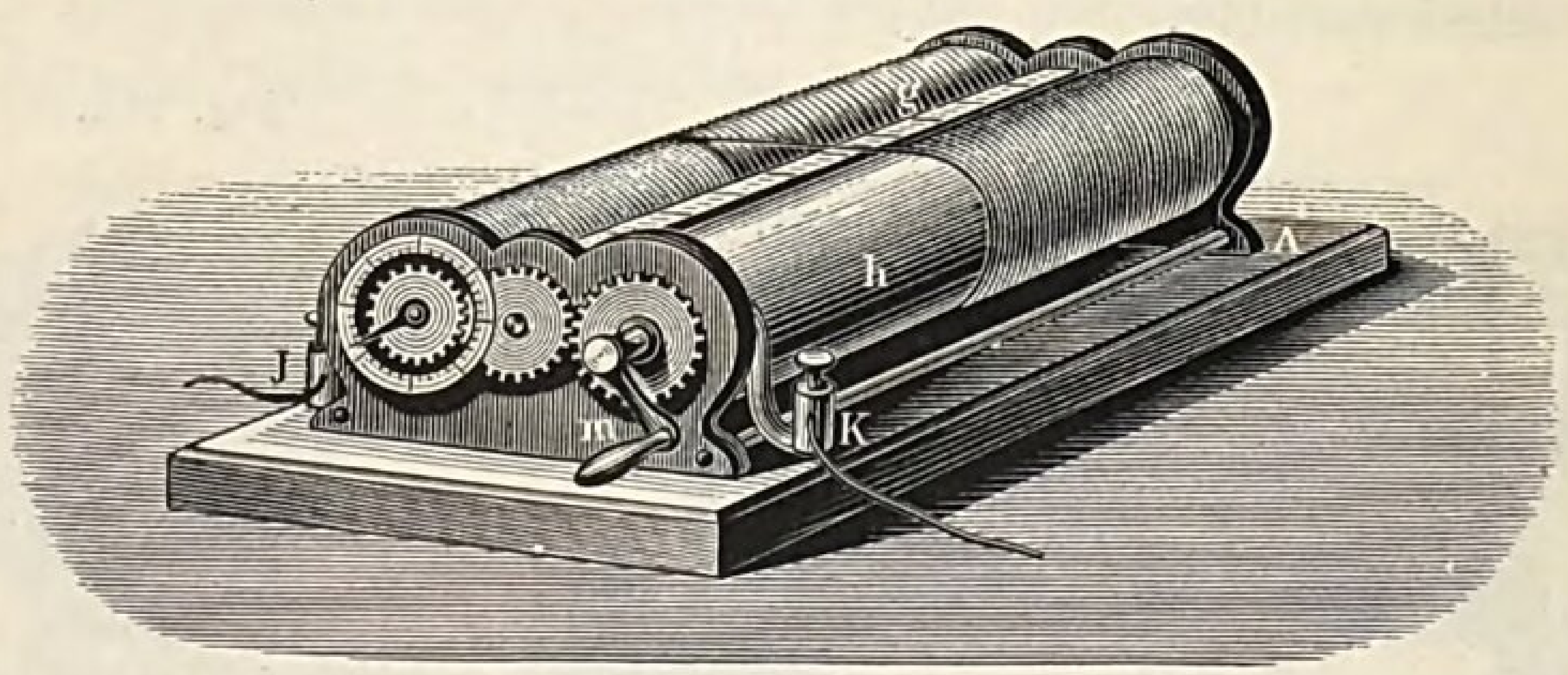
Wenn nun dieses Instrument in der Weise in den Schliessungsbogen eines galvanischen Rheomotors eingeschaltet wird, dass der eine Zuleitungsdraht in das Messingsäulchen bei *s*, der andere in das Messingsäulchen bei *t* eingeschraubt wird, so gelangt der bei *s* eintretende Strom von da durch den messingenen Träger zur metallenen Axe des Steincylinders (die aber nicht durchgeht), von dieser auf den Draht, welcher auf den Cylinder aufgewickelt ist, und durchläuft dessen Windungen bis zur Rolle *r*, von welcher er dann über *b* zum Messingsäulchen *t* gelangt. Je nachdem man also durch Drehen mittelst der Kurbel *h* das Röllchen an eine andere Stelle des Drahtes bringt, kann man bewirken, dass der Strom eine grössere oder geringere Anzahl von Windungen dieses Drahtes durchläuft.

Der Stab *ab* ist mit einer Theilung in der Art versehen, dass jeder Theilstrich einer Windung des Drahtes entspricht und dass das Röllchen

auf dem Nullpunkt dieser Theilung steht, wenn seine Rinne gerade auf dem Anfangspunkte der Windungen, auf der rechten Seite des Cylinders aufsitzt. — Um noch Unterabtheilungen der Windungen ablesen zu können, ist die messingene Fassung des Steincylinders in 100 gleiche Theile getheilt und diese Theilung wird an einem Index bei *i* abgelesen.

Nehmen wir an, in den durch möglichst kurze und dicke Kupferdrähte hergestellten Schliessungsbogen irgend eines Rheomotors, etwa eines einfachen Zinkkohlenbechers, sei nur noch eine Tangentenbussole und der auf Null gestellte Rheostat Fig. 361 eingeschaltet, so wird die Tangentenbussole eine gewisse Ablenkung zeigen, welche mehr und mehr abnimmt, wenn der Rheostat so gedreht wird, dass das Röllchen *r* auf 10, 20, 30 etc. steht, weil nun ausser dem anfänglichen Widerstande noch der von 10, 20, 30 Umwindungen zu überwinden ist.

Fig 363.

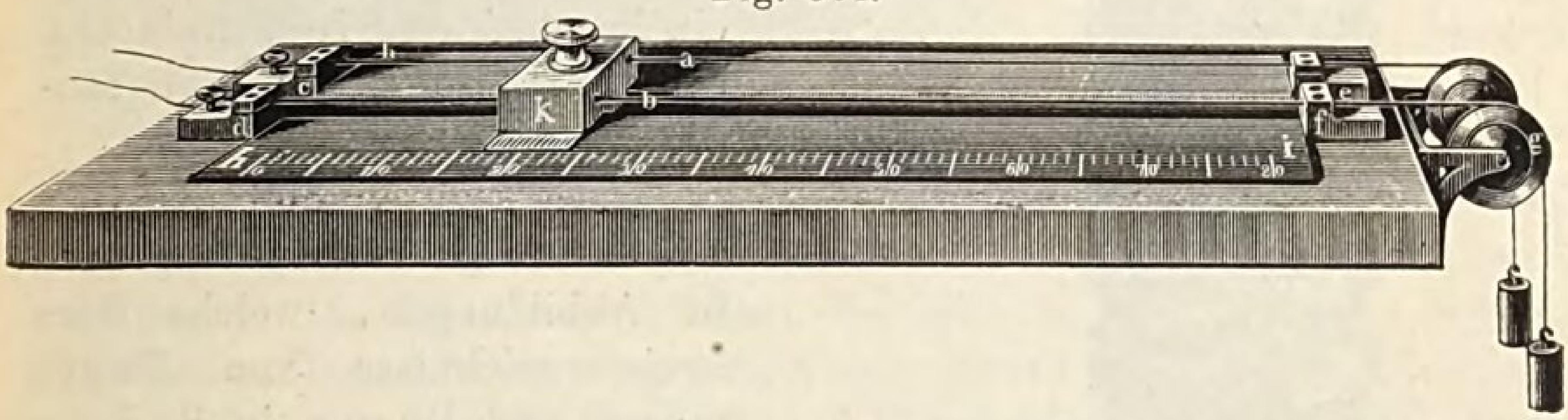


Um die durch Rheostatenwindungen gemessenen Widerstände nach irgend einer bestimmten Widerstandseinheit angeben zu können, muss man ermitteln, wie gross der Leitungswiderstand einer Rheostatenwindung, nach dieser Einheit gemessen, ist.

In Fällen, wo der Gesammtwiderstand der Kette sehr gross ist, würde man bedeutende Längen des dickeren Drahtes ab- oder aufwickeln müssen, um eine merkliche Aenderung der Stromstärke zu erzielen. In solchen Fällen muss man deshalb einen Rheostaten mit dünnem Draht anwenden. Fig. 363 stellt Wheatstone's Rheostat mit dünnem Draht dar. Es ist *g* ein Cylinder von trockenem Holze, ungefähr 16 cm lang und 4 cm im Durchmesser; *h* ist ein Cylinder von Messing, welcher dieselben Dimensionen hat. Die Axen beider Cylinder sind einander parallel. Auf dem Holzcylinder ist ein flaches Schraubengewinde eingeschnitten, und an einem seiner Enden (dem vorderen unserer Figur) trägt derselbe einen Messingring, an welchem das eine Ende eines langen, sehr dünnen Drahtes angelöthet ist. Dieser wird auf dem Holzcylinder so aufgewickelt, dass er die sämmtlichen Schraubengänge ausfüllt und dann mit seinem anderen Ende auf dem jenseitigen Ende des Messingcylinders befestigt. Die zum Einschrauben der Zuleitungsdrähte bestimmten Messingsäulchen *i* und *k* sitzen auf Metallfedern, von denen

die eine gegen das vordere Ende des Messingcylinders *h*, die andere gegen den Messingring am vorderen Ende des Holzcylinders *g* drückt. Die abnehmbare Kurbel *m* dient zum Drehen der Cylinder um ihre Axen. Steckt man sie auf den Cylinder *h* und dreht nach der Rechten, so wird der Draht vom Holzcylinder *g* auf den Messingcylinder gewickelt; steckt man sie dagegen auf die Axe des Cylinders *g* und dreht man nach der Linken, so geschieht das Umgekehrte. Die Drahtwindungen bedecken nun den vorderen Theil des Holzcylinders *g* und den hinteren Theil des Messingcylinders *h*. Da die Windungen auf dem Holzcylinder isolirt sind und durch die in das Holz geschnittenen Schraubengänge von einander entfernt gehalten werden, so durchläuft der Strom ihrer ganzen Länge nach die Windungen des Drahtes, welche auf dem vorderen Theil von *g* aufgewickelt sind. Auf dem Messingcylinder *h* aber, wo die Drahtwindungen nicht mehr isolirt sind, geht der Strom von der Stelle, wo der Draht mit dem Messingcylinder in Berührung kommt,

Fig. 364.



sogleich zu der Feder bei *k*. Der als Widerstand wirksame Theil des Drahtes ist also das veränderliche Stück desselben, welches sich auf dem Holzcylinder befindet, sammt dem Stückchen, welches die Verbindung zwischen den zwei Cylindern bildet.

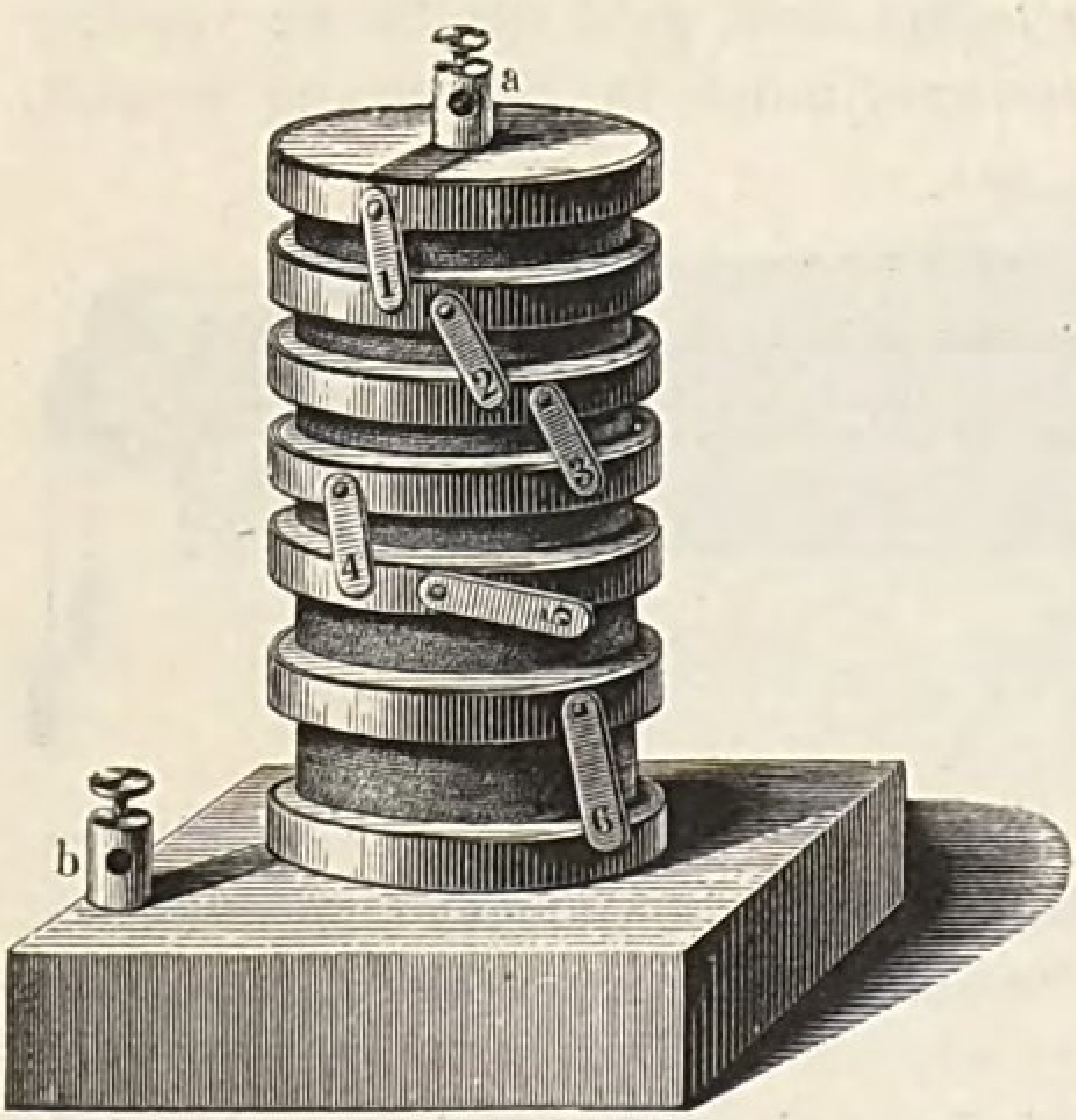
Die Schraubengänge des Holzcylinders haben eine Höhe von $^1/_2$ mm. Der Draht ist am besten von Neusilber und hat $^1/_4$ mm im Durchmesser. Zur Zählung der abgewickelten Windungen ist eine Scala zwischen den beiden Cylindern angebracht, die Bruchtheile einer Windung aber werden mittelst eines Zeigers bestimmt, welcher an der Axe des Cylinders *g* befestigt auf die Theilstriche eines getheilten Kreises hinweist.

Für genauere Untersuchungen mehr geeignet als der oben beschriebene Rheostat ist Poggendorff's Rheocord, Fig. 364. Zwei Platindrähte *a* und *b* sind über ein Brett so ausgespannt, dass zwischen ihnen nur durch das sogleich zu besprechende Stück *k* eine leitende Verbindung besteht. Einerseits sind sie in die kupfernen Lager *c* und *d*, andererseits in die Lager *e* und *f* eingeklemmt. Der Schieber *k* enthält ein viereckiges Kästchen von Eisenblech, dessen nach den Lagern gekehrte Seiten durch Scheiben von Glas oder Elfenbein gebildet sind. Die Drähte *a* und *b* sind durch kleine, sie gerade hindurchlassende Löcher in diesen Scheiben hindurchgezogen. Das Kästchen ist

mit Quecksilber gefüllt. Sind nun in die Lager *c* und *d* die Poldrähte eines galvanischen Rheomotors eingeklemmt, so geht der Strom von *c* durch den Draht *a* zum Kästchen *k*, dann durch das Quecksilber in demselben zum Draht *b* und endlich durch den Draht *b* nach dem Lager *d*. Durch Verschiebung des Kästchens wird die Länge der durchströmten Drahtstücke geändert und man kann dieselbe auf einem messingenen Maassstab ablesen, welcher aber mit den Lagern, zwischen denen die Drähte ausgespannt sind, nicht in leitender Berührung sein darf.

Die bisher beschriebenen Apparate lassen eine stetige Aenderung des Widerstandes zu. Die folgenden dienen zur sprungweisen Aenderung desselben. Die ursprünglich von Eisenlohr construirte, in Fig. 365 aus historischem Interesse noch abgebildete Widerstandssäule ist jetzt durch den bequemeren auf demselben Princip beruhenden Siemens'schen Stöpselrheostaten vollständig verdrängt.

Fig. 365.



Die Figuren 366 bis 368 zeigen einige dieser Apparate in Abbildungen, welche dem Preisverzeichnisse von Hartmann und Braun in Bockenheim-Frankfurt a. M. entnommen sind. In Fig. 366 ist die Vorderwand geöffnet gezeichnet, um die innere Einrichtung zu zeigen. Auf dem aus Hartgummi angefertigten Deckel des Kastens befindet sich eine Reihe prismatischer Messingstücke, welche durch schmale Zwischenräume von einander getrennt sind. Die an einander grenzenden Seiten dieser Messingstücke sind mit cylindrischen Ausschnitten versehen, so dass zwischen je zwei Stücke ein schwach conischer vergoldeter Messingzapfen mit starker Reibung eingesetzt werden kann. Die äussersten Messingstücke der Reihe sind mit Klemmvorrichtungen zum Ansetzen von Drähten oder Blechstreifen versehen. Innerhalb der Kästchen sind nun ausserdem je zwei benachbarte Messingstücke durch aufgewundene isolirte Neusilberdrähte von genau bestimmtem Widerstande mit einander in Verbindung gesetzt. Diese Widerstände haben meistens eine nach dem Decimalsystem aufsteigende Grösse, wie dies auch bei den Gewichtssätzen üblich ist.

Werden nämlich sämmtliche Stöpsel eingesteckt, so ist der Widerstand wegen des bedeutenden Querschnittes der Leitung gleich Null zu setzen. Zieht man dann einen oder mehrere Stöpsel heraus, so wer-

den die betreffenden Drähte in die Leitung eingeschaltet, da der Strom dann nicht mehr direct quer von einem Messingstück zum anderen übergehen kann, sonderen die Drahtwindungen durchlaufen muss. Fig. 366 zeigt z. B. den Widerstand 100 + 40 + 30 + 20 = 190 Ohm eingeschaltet. Eine ähnliche Einrichtung hat der kleine Apparat Fig. 367 mit kreisförmig angeordneten Backen. Der Rheostat Fig. 368 hat eine etwas abweichende Einrichtung. Hier sind eine Reihe von Messingstücken parallel zu einem langen Messingprisma angeordnet und die cylindrischen Einschnitte so angebracht, dass durch einen Stöpsel jedes Messingstück mit dem langen Prisma verbunden werden kann. Zwischen den kurzen Messingstücken sind Drahtspulen von lauter gleichen Widerständen, z. B. von je 1 Ohm, eingeschaltet. Die Zuleitungen führen einerseits zu dem Ende des langen Prismas, andererseits zu dem äussersten gegenüber liegenden Messingstück. Um nun beispielsweise den Widerstand 5 einzuschalten, setzt

Fig. 366.

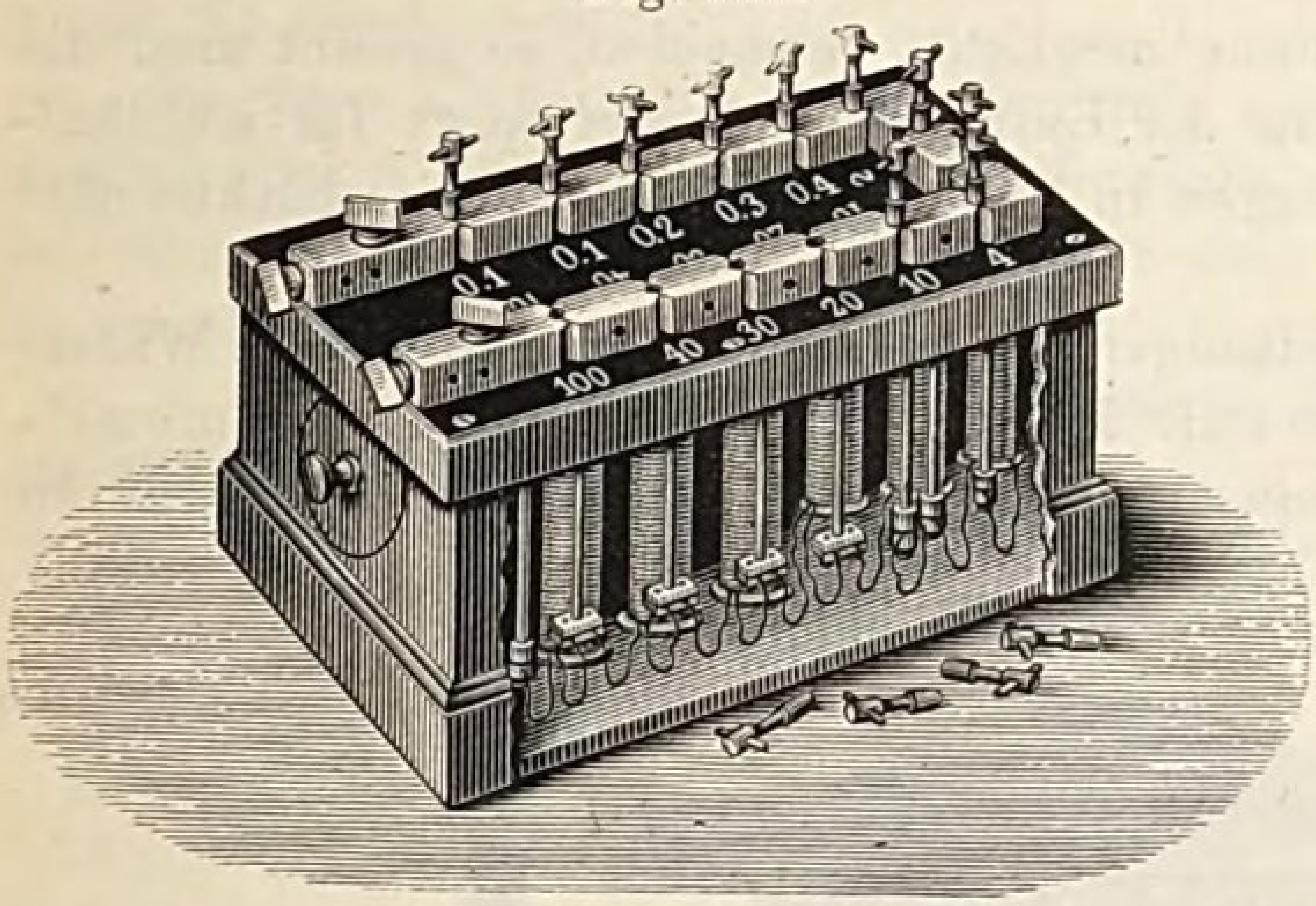


Fig. 367.

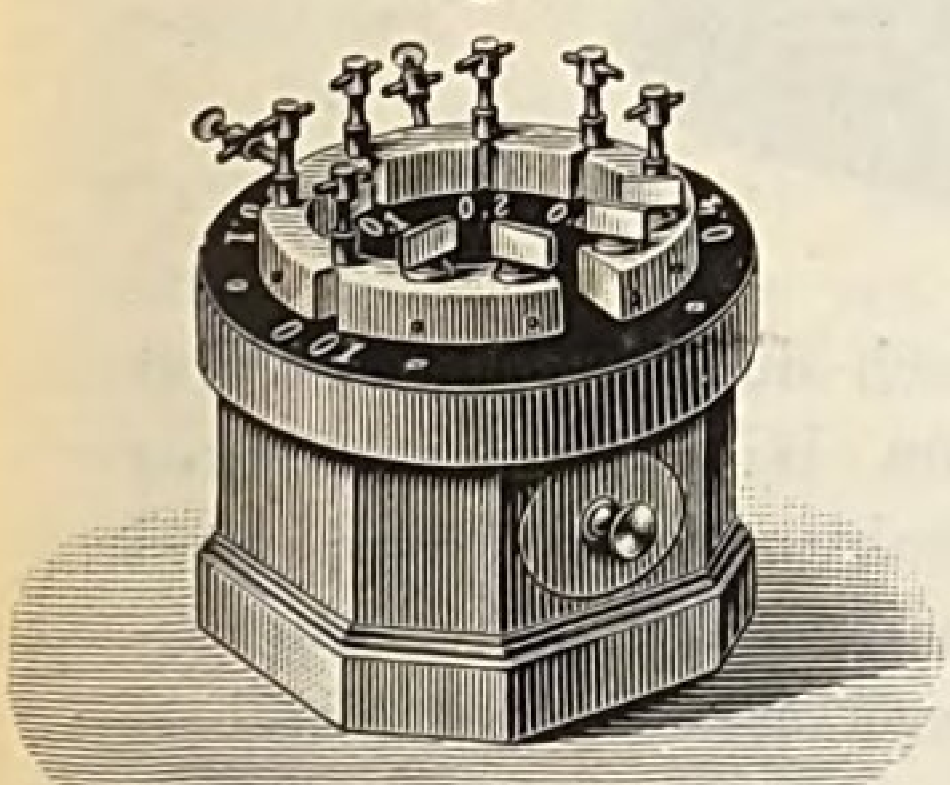
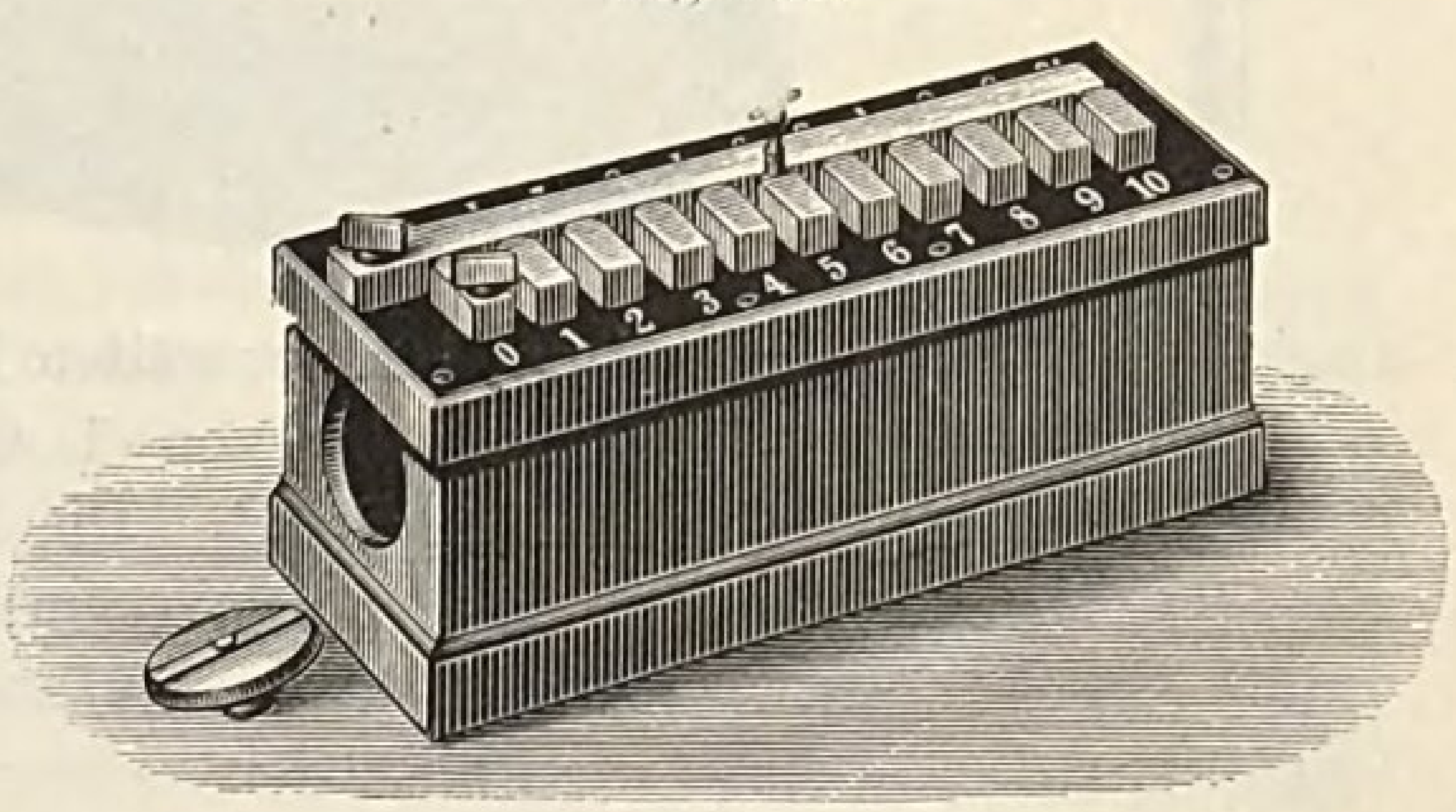


Fig. 368.



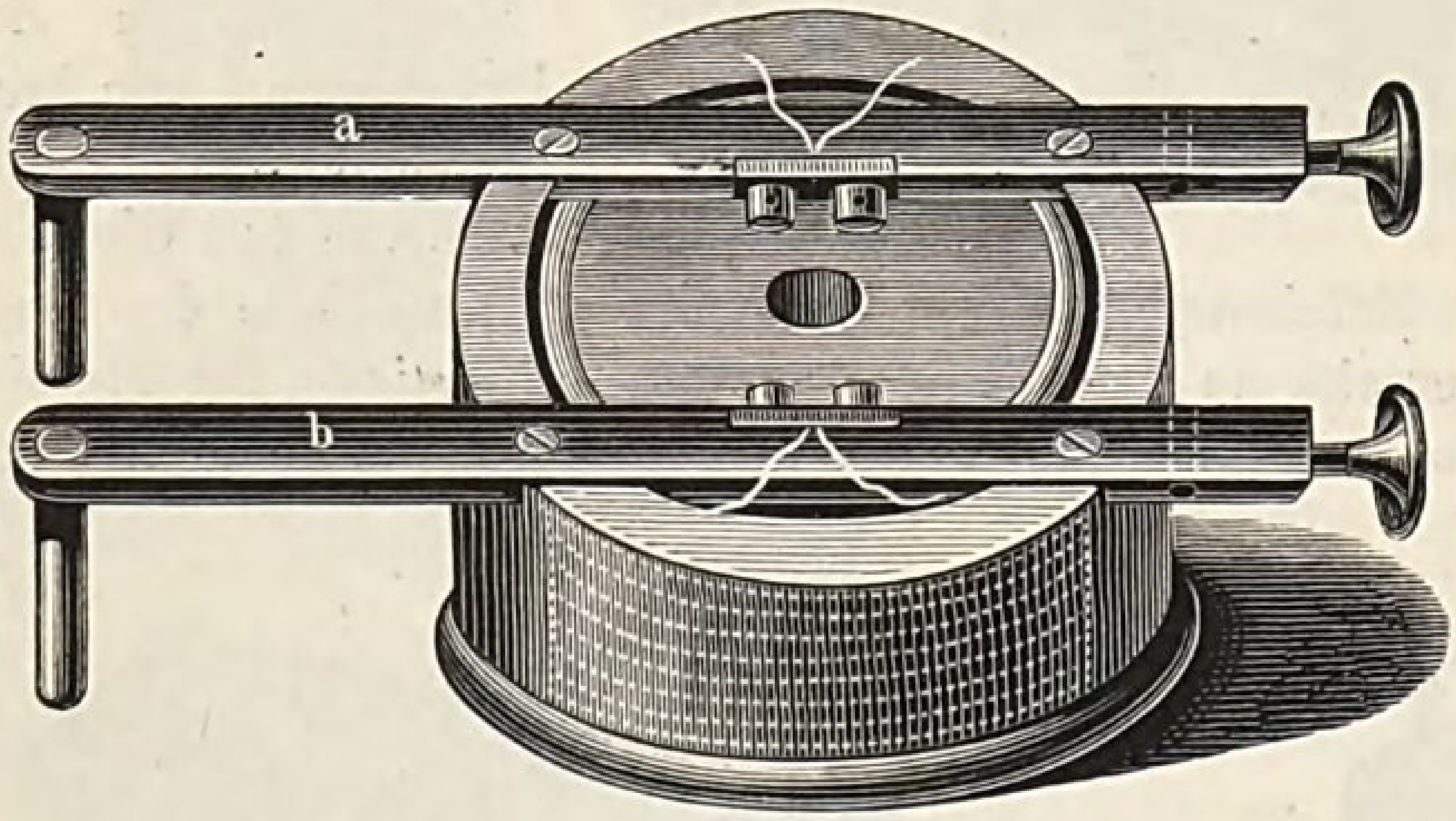
man den Stöpsel auf Nr. 5. Diese Anordnung gestattet nur eben so viele Widerstände herzustellen, als Drahtspulen vorhanden sind, während die vorher beschriebene viele Combinationen zulässt. Dagegen braucht hier der Strom nie mehr als einen Stöpselcontact zu passiren, wodurch eine Quelle einer Ungenauigkeit vermieden wird, welche bei der ersten Anordnung durch die Addition vieler kleiner Uebergangswiderstände an den Contacten entstehen kann. Ausser diesen Anordnungen giebt es noch andere zum Theilen des Stromes, von denen noch in der Folge die Rede sein wird. Auch ist es sehr bequem, wenn man von den Messing-

backen aus Seitenleitungen anbringen kann, wozu die seitlichen Bohrungen dienen, in welche Stöpsel mit Klemmvorrichtung einzustecken sind. Stärkere Ströme dürfen durch solche Rheostaten nicht gesendet werden, da sonst die Drahtspulen zu sehr erwärmt und dadurch in ihrem Widerstand verändert oder gar ihre Seidenumhüllungen verbrannt werden. Die genaueren Apparate dieser Art sind übrigens für eine bestimmte Temperatur regulirt und zur Aufnahme eines Thermometers eingerichtet.

Will man die Erwärmung möglichst vermeiden, so spannt man die Drähte in Zickzacklinien in der Luft frei aus oder sorgt für Kühlhaltung derselben durch Einlegen in Flüssigkeiten, welche die Elektricität nicht leiten (Alkohol).

Zur Einschaltung in Leitungen für sehr starke Ströme werden Widerstände aus Drahtnetzen benutzt. Fig. 369 zeigt die Form der Siemens'schen Etalons der Widerstandseinheit. In einer runden Holzbüchse, deren

Fig. 369.



Deckel und Boden von einem 10 mm weiten Loch durchbrochen ist, ist ein gut isolirter Konstantandraht von 1 Ohm Widerstand in einer doppelt gewundenen Spirale eingelegt. Die Drahtenden sind mit zwei starken Messingstäben verbunden, welche einerseits amalgamirte Kupferdrähte zum Eintauchen in Quecksilbernäpfe, andererseits Klemmschrauben tragen.

131 **Maasseinheiten der elektromotorischen Kraft.** Wie für Stromstärke und Widerstand, so hat man auch für die elektromotorische Kraft zunächst ein willkürliches Maass angenommen, indem man die elektromotorische Kraft des Daniell'schen Elementes zur Einheit wählte. Abgesehen von dem Umstande, dass diese Einheit je nach der Zusammensetzung des Elementes etwas schwankender Grösse ist, erschien es geboten, den absoluten Einheiten der Stromstärke und des Widerstandes auch eine absolute Einheit der elektromotorischen Kraft an die Seite zu setzen.

Man gelangt zu einer solchen mit Hülfe des Ohm'schen Gesetzes, indem man als absolute Einheit der elektromotorischen Kraft jene bezeichnet, welche in einem Leiter vom absoluten Widerstand = 1 die absolute Stromstärke 1 entstehen lässt. Da wir dabei das elektromagnetische Strommaass zu Grunde legen, so erhalten wir auch für die elektromotorische Kraft ein elektromagnetisches Maass. Bezogen auf Centimeter, Gramm und Secunde wollen wir dasselbe demnach als Elektromotorische Krafteinheit (C. Gr. S.) bezeichnen.

Da diese Einheit unbequem klein ist, so hat der elektrische Congress in Paris 1881 das Hundertmillionfache davon als praktische Einheit der elektromotorischen Kraft unter dem Namen Volt eingeführt. Es ist also:

$$1 \text{ Volt} = 10^8 \text{ elektromotorische Krafteinheiten (C. Gr. S.)};$$

da, wie wir früher mittheilten,

$$1 \text{ Amp.} = {}^1/_{10} \text{ Stromeinheit (C. Gr. S.) und}$$

$$1 \text{ Ohm} = 10^9 \text{ Widerstandseinheit (C. Gr. S.)},$$

so gilt neben:

$${}^1/_{10} \text{ Stromeinheit (C.Gr.S.)} = \frac{10^8 \text{ elektrom. Krafteinh. (C.Gr.S.)}}{10^9 \text{ Widerstandseinh. (C.Gr.S.)}}$$

auch

$$1 \text{ Amp.} = \frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ohm}},$$

das heisst, wir können definiren, 1 Volt ist jene elektromotorische Kraft, welche in einem Leiter von 1 Ohm Widerstand eine Stromstärke = 1 Amp. entwickelt. Wir wollen hierfür als Abkürzung V. schreiben.

Die elektromotorische Kraft eines Daniell'schen Elementes, dessen Zink in mit 15 Vol. Wasser verdünnter Schwefelsäure steht, welche durch eine Thonzelle von der concentrirten Kupfersulfatlösung getrennt ist, beträgt nach A. v. Waltenhofen*), dem wir die erste genaue Bestimmung dieser Zahl verdanken, 1,088 V. Mit dieser Zahl stimmen die meisten anderen Messungen nahe überein.

Bei Anwendung einer Zinksulfatlösung statt der Schwefelsäure wird die elektromotorische Kraft nach E. Kittler**) etwas kleiner. Am grössten ist sie in dem sogenannten Normal-Daniell, welches nach Kittler aus amalgamirtem, chemisch reinem Zink in verdünnter Schwefelsäure vom specif. Gew. 1,075 bei 18° C. und chemisch reinem Kupfer in concentrirter Kupfersulfatlösung vom specif. Gew. 1,19 bis 1,20 besteht, wobei die Flüssigkeiten nicht durch eine Thonzelle getrennt sind, sondern in getrennten Gefässen sich befinden, die durch heberförmige Glasröhren mit einander communiciren. Für dieses Element fand

*) Pogg. Ann. Bd. 133 (1868), S. 465; Zeitschr. für Elektrotechnik 1884 S. 707.

**) Wiedem. Ann. Bd. 17 (1882), S. 873.

E. Kittler mittelst Elektrometers die elektromotorische Kraft = 1,195 V., während jene des Elementes mit Zinksulfat zu 1,059, jene eines gewöhnlichen Daniellelementes zu 1,14 bis 1,10 und darunter gefunden wurde.

Diese Messungen basiren auf einem Vergleich mit dem Element von Latimer Clark, welches ebenfalls oft als Normalelement benutzt wird. Dasselbe besteht aus reinem Quecksilber, bedeckt mit einem durch Kochen von Quecksilbersulfat in concentrirter Zinksulfatlösung erhaltenen Teige, in welchen chemisch reines amalgamirtes Zink (als negativer Pol) eintaucht. Dieses Element hat nach Clark bei 15,5° C. eine elektromotorische Kraft von 1,457 V., nach A. v. Ettingshausen*) und Lord Rayleigh 1,433 V. Es ist sehr constant, ändert sich aber mit der Temperatur, indem die elektromotorische Kraft für jeden Grad Temperaturanstieg um 0,06 bis 0,08 Proc. abnimmt, während das Daniell'sche Element innerhalb 6° bis 7° keine Aenderung zeigt.

Für das Bunsen-Element kann ungefähr 1,9 V., für das Element von Leclanché 1,5 V. angenommen werden.

132 **Zusammenhang zwischen Potentialdifferenz und elektromotorischer Kraft. Elektromagnetische Capacitätseinheit.** Potentialdifferenz und elektromotorische Kraft werden sehr häufig als identische Begriffe angesehen. Das sind sie strenge genommen nicht, wohl aber werden beide Grössen im nämlichen Maasssystem durch die gleiche Zahl ausgedrückt.

Wir definiren „Potentialdifferenz" als eine solche Ungleichheit im elektrischen Zustande zweier Leiter oder Theile eines Leiters, infolge welcher ein Quantum Elektricität von dem einen zum anderen getrieben wird. Wir messen die Grösse dieser Potentialdifferenz durch die Anzahl von Arbeitseinheiten, welche wir aufwenden müssten, um die Einheit positiver Elektricität von dem einen Leiter auf den anderen zu schaffen. Je nachdem wir hierbei die elektrostatische oder die elektromagnetische Elektricitätseinheit zu Grunde legen, erhalten wir die Potentialdifferenz in elektrostatischem oder in elektromagnetischem Maasse ausgedrückt (siehe §. 65 und §. 121).

Denken wir uns die beiden Leiter durch einen Draht verbunden, so wird die beim Ueberfliessen der Elektricität vom höheren zum niedrigeren Potential gewonnene Arbeit in Form einer äquivalenten Wärmemenge in dem Drahte zum Vorschein kommen. Würden wir die auf diese Weise durch den Uebergang einer elektrostatischen Einheit der Elektricitätsmenge erzeugte Wärmemenge — etwa in einem Riess'schen Luftthermometer — messen, die erhaltene Zahl mittelst des mechanischen Wärmeäquivalents in Arbeitseinheiten umrechnen und diese in absolutem Maasse, also in Erg's ausdrücken, so erhielten wir in dieser Zahl die Potentialdifferenz in absolutem elektrostatischem Maasse.

*) A. v. Ettingshausen, Zeitschr. f. Elektrotechnik 1884, S. 484.

Die Potentialdifferenz ist die Ursache jener Strömung der Elektricität, welche das Gleichgewicht derselben wieder herzustellen und gleiches Potentialniveau auf den verbundenen Leitern herbeizuführen strebt. Als elektromotorische Kraft dagegen bezeichnen wir jene Kraft, welche, das Gleichgewicht störend, Elektricität von niedrigerem Potential auf höheres anhäuft, wie es z. B. bei der Elektrisirung durch Reibung geschieht. Die Grösse dieser elektromotorischen Kraft messen wir durch die Grösse der von ihr hervorgebrachten Potentialdifferenz. Darum sind beide Grössen durch dieselbe Zahl ausgedrückt.

Fassen wir jetzt den Vorgang in einem Volta'schen Elemente ins Auge, bei welchem wir uns der Einfachheit wegen vorstellen wollen, dass durch den chemischen Process an einer einzigen Angriffsstelle diesseits und jenseits derselben eine Potentialdifferenz hervorgerufen werde. Der gesammte Schliessungskreis habe einen Widerstand = Eins (C.Gr.S.) und ebenso sei der dadurch zu Stande kommende Strom von der Stärke Eins (C. Gr. S.). Derselbe führt demnach per Secunde eine Einheit der Elektricitätsmenge (C. Gr. S.) vom höheren Potential zum niedrigeren und entwickelt dabei in der Widerstandseinheit gemäss der Definition der letzteren (§. 126) Eine Arbeitseinheit. Da wir nun die Potentialdifferenz messen durch die Menge der Arbeitseinheiten, welche beim Uebergang der Elektricitätseinheit gewonnen werden, so werden wir sagen, die obige Potentialdifferenz sei im absoluten Maasse = Eins. Dieses Maass wird aber diesmal das elektromagnetische sein, weil wir die Elektricitätsmenge auch nach elektromagnetischem Maasse gemessen haben. Auch hier ist die Potentialdifferenz die unmittelbare Ursache des Stromes, welcher das Gleichgewicht widerherzustellen und die Ungleichheiten des Potentialniveaus auszugleichen strebt. Die elektromotorische Kraft des chemischen Processes dagegen ist die Ursache der Entstehung der Potentialdifferenz, also der Störung des Gleichgewichtes. Freilich wird dadurch die elektromotorische Kraft zur entfernteren, indirecten Ursache des Stromes und deshalb wird sie manchmal mit der unmittelbaren Ursache des letzteren, der Potentialdifferenz, verwechselt. Jedenfalls werden auch hier beide durch dieselbe Zahl ausgedrückt. Dass Potentialdifferenz und elektromotorische Kraft nicht identisch sind, geht schon daraus hervor, dass die letztere vorhanden sein kann ohne die erstere. Wir werden in der Lehre von der Induction erfahren, dass, wenn man einen Magnetpol senkrecht durch die Axe eines ringförmigen Leiters bewegt, in dem letzteren an allen Stellen zugleich eine elektromotorische Kraft auftritt, welche unmittelbar einen Strom erregt, ohne dass dabei vorher eine Potentialdifferenz entsteht.

Wir können uns diesen Sachverhalt durch ein analoges Bild aus der Hydrodynamik klar zu machen suchen. Es sei eine horizontal verlaufende, kreisförmig gebogene und in sich zurückkehrende offene Rinne mit Wasser gefüllt. Um das Wasser in constantem Strome circuliren zu machen, könnten wir auf zweierlei Weise verfahren. Einmal bringen

wir eine Querwand senkrecht auf die Rinne an und pumpen das Wasser constant von der einen Seite der Querwand auf die andere. Das Niveau wird dadurch auf der einen Seite erniedrigt, auf der anderen erhöht und diese Niveaudifferenz bringt eine constante Strömung im Kreise hervor. Die Niveaudifferenz entspricht der Potentialdifferenz, die Pumpe der elektromotorischen Kraft des Volta'schen Elementes.

Ein andermal lassen wir die Querwand fort, stellen dafür eine Anzahl Arbeiter an die Rinne, welche mit Rudern in das Wasser tauchen und dasselbe nach einer Richtung fortstossen. Sind die Ruder zahlreich genug, so dass jedes Wasserquantum durch dieselben direct angetrieben wird, so wird zwar ein Strom, aber keine Niveaudifferenz entstehen. Die treibende Kraft ist in diesem Falle überall gleich vertheilt, während sie im früheren Beispiele auf eine Stelle concentrirt war. Hier entsprechen die treibenden Ruder der elektromotorischen Kraft, die nicht vorhandene Niveaudifferenz entspricht der nicht vorhandenen Potentialdifferenz bei dem erwähnten Inductionsversuche.

Kehren wir zum Volta'schen Elemente zurück. Wir haben da zwei Vorgänge neben einander. Die elektromotorische Kraft bringt an der Stelle des chemischen Angriffes fortwährend eine constante Potentialdifferenz hervor*), während andererseits der Strom diese wieder auszugleichen sucht. Offenbar muss da ein stationärer Zustand eintreten, zwar nicht ein Zustand statischen Gleichgewichtes der Kräfte, aber ein solcher dynamischen Gleichgewichtes der Bewegungen, indem die eine Bewegung (der Strom) das compensirt, was die andere Bewegung (die Erhebung der Elektricität aufs höhere Potential) leistet.

An Stellen, welche von dem Orte der elektromotorischen Kraft mehr oder weniger entfernt liegen, kann daher die Potentialdifferenz nicht mehr so gross sein, wie unmittelbar zu beiden Seiten der Angriffsstelle, denn die Potentialhöhe muss längs des Stromkreises abnehmen. Wir erfahren hieraus neuerdings den Unterschied zwischen Potentialdifferenz und elektromotorischer Kraft. An zwei beliebigen Stellen des gesammten Schliessungskreises der Kette findet sich eine Potentialdifferenz, aber nur unmittelbar zu beiden Seiten der Stelle des chemischen Angriffes ist die Potentialdifferenz am grössten und gleich gross wie die elektromotorische Kraft. Die Potentialdifferenz ist also jedenfalls der weitere Begriff und ist nur in einem speciellen Werthe mit der elektromotorischen Kraft — der Grösse nach — zusammenfallend.

Die Abnahme der Potentialdifferenz von der Angriffsstelle weg wird um so rascher erfolgen, je weniger der Strom in seiner ausgleichenden Wirksamkeit auf Widerstand stösst. Dies führt uns zu einer theoreti-

*) Von den etwa durch Contactwirkung an anderen Stellen der Kette hervorgebrachten Potentialdifferenzen, welche, wie im §. 111 erörtert wurde, für die Strombildung nicht in Betracht kommen, sehen wir hier zunächst ab.

schen Ableitung des Zusammenhanges zwischen elektromotorischer Kraft, Stromstärke und Widerstand, also zu einer Theorie des Ohm'schen Gesetzes, welcher der nächste Paragraph gewidmet sein soll.

Hier wollen wir noch etwas über das elektromagnetische Maass der Capacität anfügen. Nach §. 68 versteht man unter Capacität die Menge von Elektricität, welche einen Leiter bis zum Potentiale 1 ladet. Misst man die Elektricitätsmenge nach absolutem elektromagnetischem Maasse (C.Gr.S.), ebenso die Potentialdifferenz zwischen einem Leiter und der Erde (oder zwischen den Platten eines Condensators) nach diesem Maasse, so erhält man als absolute elektromagnetische Einheit (C.Gr.S.) der Capacität jene eines Leiters, welcher durch die Elektricitätsmenge 1 (C.Gr.S.) zum Potentiale 1 (C.Gr.S.) geladen wird. Diese Einheit ist unbequem gross; es wurde daher der tausendmillionte Theil derselben als „praktische Capacitätseinheit" eingeführt und mit dem Namen Farad belegt. Es ist also:

$$1 \text{ Farad} = 10^{-9} \text{ absolute elektromagn. Capacitätseinheit (C.Gr.S.)}$$

oder auch:

$$1 \text{ Farad} = \frac{1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ Volt}},$$

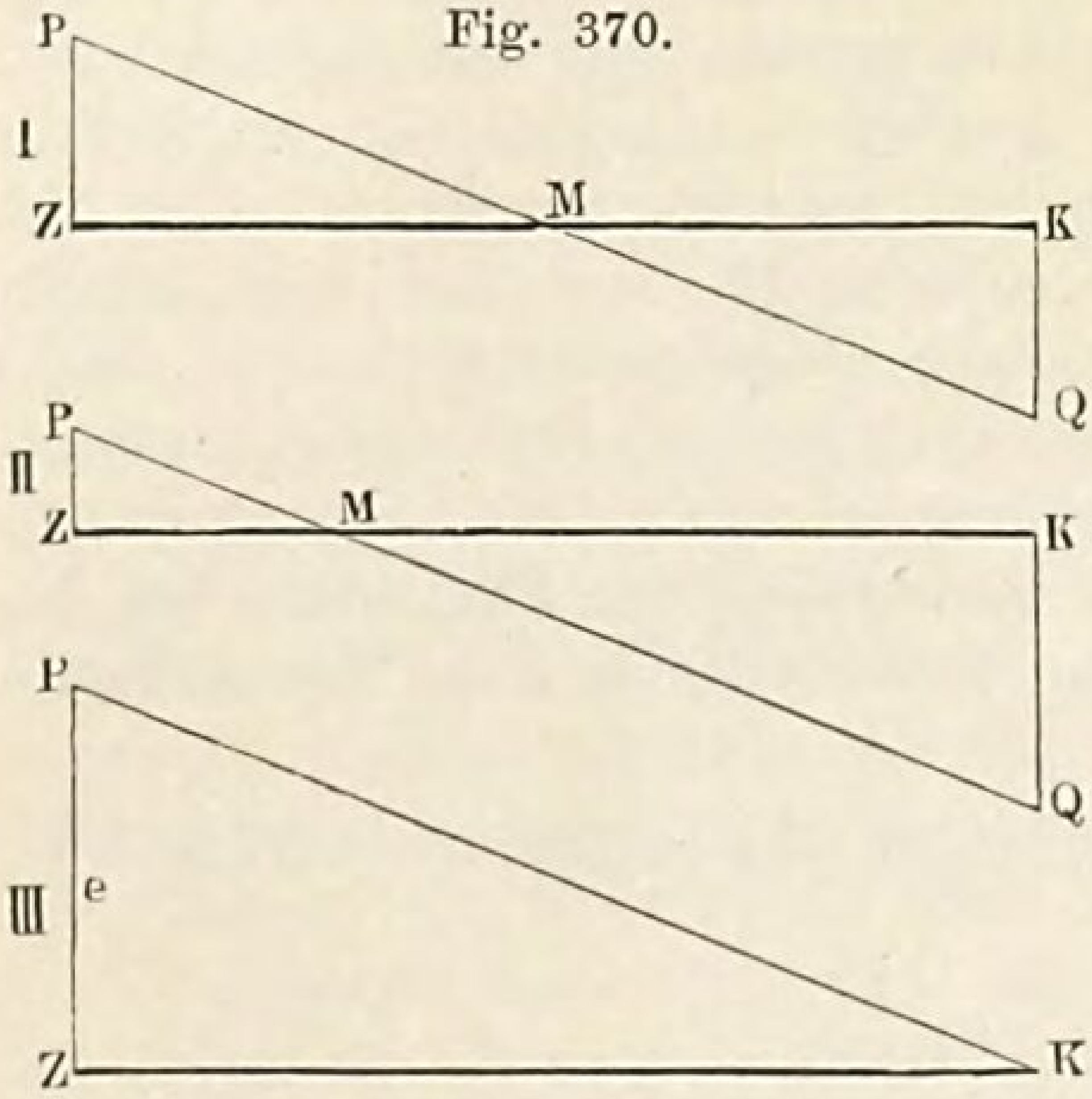
d. h.: **1 Farad ist die Capacität eines Leiters, der mit der Elektricitätsmenge 1 Coulomb bis zum Potentiale 1 Volt geladen wird.**

Auch 1 Farad ist noch eine unbequem grosse Einheit; man gebraucht daher meist den millionten Theil desselben als **Mikrofarad**. Diese Einheit ist nebenbei bemerkt noch immer 900 000 mal grösser als die elektrostatische Capacitätseinheit. Eine Kugel von 9 Kilometer Durchmesser hat die Capacität 1 Mikrofarad; die auf Seite 258 berechnete Leydener Flasche von 600 elektrostatischen Capacitätseinheiten hätte in elektromagnetischem Maasse 0,00067 Mikrofarad Capacität.

Theoretische Ableitung und graphische Darstellung des Ohm'schen Gesetzes. 133 Wir betrachten **zuerst den einfachsten Fall**, wo wir einen einzigen linearen Leiter von constanter Beschaffenheit vor uns haben, an dessen Enden eine constante Potentialdifferenz hervorgebracht wird. Wir kommen der Verwirklichung dieses Falles sehr nahe, wenn wir uns eine in sich geschlossene ringförmige Flüssigkeitssäule von constantem Querschnitte vorstellen, die an irgend einer Stelle durch eine Kupfer-Zinkplatte unterbrochen ist, so dass das eine Ende der Flüssigkeitssäule mit dem Kupfer, das andere mit dem Zink in Berührung ist. Indem wir die Plattendicke vernachlässigen und den ganzen Stromkreis in eine gerade Linie ausgestreckt denken, gelangen wir zu dem Schema Fig. 370 (a. f. S.). Die Abscisse ZK bedeutet die Länge des Leiters, in unserem Beispiele der Flüssigkeitssäule, die Ordinaten ZP und KQ die Höhen des Potentials an den Enden desselben.

Die schiefe Linie PQ giebt durch ihre Ordinaten die Höhen des Potentials für die dazwischen liegenden Querschnitte des Leiters. Fig. 370 I entspricht dem Fall, wo der ganze Leiter isolirt blieb oder in der Mitte bei M abgeleitet wurde, Fig. 370 II dem Fall, wo er an irgend einem anderen Punkte M zwischen Z und K zur Erde abgeleitet ist, endlich Fig. 370 III dem Fall, wo der eine Pol K abgeleitet ist. Da nämlich die Potentialdifferenz zwischen den Enden Z und K constant bleiben muss, so werden durch Ableitung irgend einer Stelle alle Potentiale um eine constante Grösse erhöht oder vermindert.

Fig. 370.



Wir haben hier ein analoges Verhalten wie bei der Wärmeleitung längs eines Stabes ZK, der gegen seitliche Wärmeverluste geschützt und an seinen Enden auf constanter Temperaturdifferenz erhalten wird. Wie bei der Wärmeleitung nach Eintritt des stationären Zustandes die Temperaturen vom Ende Z bis zum Ende K gleichförmig abnehmen, so nimmt hier das Potential gleichförmig ab. Bei der Wärmeleitung ist die in der Zeiteinheit durch den Querschnitt gehende Wärmemenge direct proportional dem Temperaturunterschiede zweier um die Länge Eins abstehender Schichten, ferner der Grösse des Querschnittes, endlich dem specifischen Wärmeleitungsvermögen des Stabmateriales. Bei der Elektricitätsleitung ist ganz analog die in der Zeiteinheit durch den Querschnitt fliessende Elektricitätsmenge, das heisst die Stromstärke direct proportional erstens dem Potentialunterschiede zweier um die Längeneinheit abstehender Stellen des Leiters, zweitens proportional der Grösse des Querschnittes, drittens proportional dem specifischen Leitungsvermögen des Materials des Leiters. Ist die Länge des ganzen Leiters l, der Potentialunterschied an dessen Enden $= e$, so ist $\varepsilon = \frac{e}{l}$ der Potentialunterschied zweier um die Längeneinheit abstehender Stellen des Leiters. Diese Grösse wird nach Ohm mit dem Ausdrucke Gefälle der Elektricität belegt; sie ist offenbar identisch mit der trigonometrischen Tangente des Neigungswinkels der schiefen Geraden PQ in Fig. 370.

Bezeichnen wir das specifische Leitungsvermögen mit λ und die Stromstärke mit i, so wird letztere gegeben sein durch den Ausdruck:

$$i = \varepsilon q \lambda = e \frac{q \lambda}{l}.$$

Nun ist aber $\frac{l}{q\lambda}$ die auf den Querschnitt 1 und das specifische Leitungsvermögen 1 reducirte Länge, d. i. der Widerstand des Leiters. Schreiben wir dafür r, so erhalten wir das Ohm'sche Gesetz in seiner einfachsten Form:

$$i = \frac{e}{r}.$$

Der zweite Fall wäre jener, wo der Leiter aus zwei auf einander folgenden Theilen besteht, welche im Querschnitt oder Leitungsvermögen oder beiden differiren und wo an einer der Berührungsstellen dieser zwei Leiter eine elektromotorische Kraft auftritt, welche eine constante Potentialdifferenz hervorruft. An der zweiten Berührungsstelle hingegen soll keine elektromotorische Kraft auftreten. Wir würden diesem Falle nahe kommen, wenn wir die im ersten Falle angenommene Flüssigkeitssäule in zwei Abtheilungen von ungleichen Querschnitten anwenden, oder zwei verschiedene durch eine Membran getrennte Flüssigkeiten von ungleichen specifischen Widerständen einschalten, die gegen einander nicht elektromotorisch wirksam sind.

Bezeichnen	wir	die	Längen der beiden Leiter	mit	l	und	l'
„	„	„	Querschnitte „ „ „	„	q	„	q'
„	„	„	specifischen Leitungsvermögen	„	λ	„	λ'
„	„	„	Widerstände der beiden Leiter	„	r	„	r'
„	„	„	Gefälle in den beiden Leitern	„	ε	„	ε'

Da derselbe Strom beide Leiter durchfliesst, so muss die Stromstärke in beiden dieselbe sein, mithin gelten:

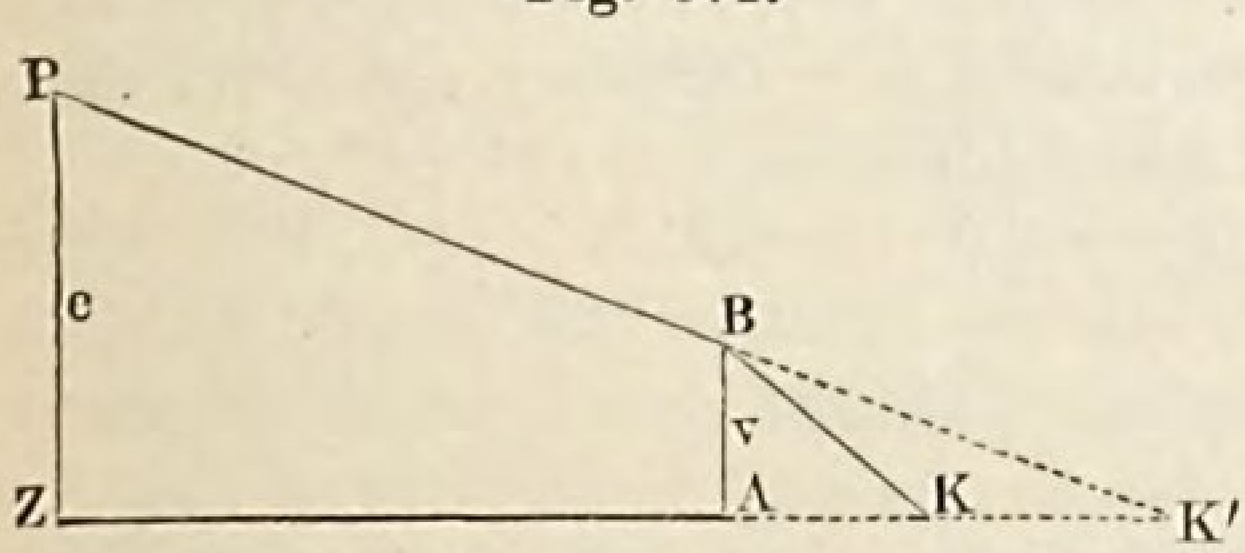
$$\varepsilon q \lambda = \varepsilon' q' \lambda' \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

Die Gefälle ε und ε' werden also diesmal im Allgemeinen ungleich sein. Es werden sich verhalten:

$$\varepsilon : \varepsilon' = q'\lambda' : q\lambda.$$

Es stelle nun in Fig. 371 die Gerade ZA den ersten Leiter von der Länge l, AK den zweiten Leiter von der Länge l' vor. Das Potentialdiagramm wird dann durch eine gebrochene Linie PBK dargestellt werden. Wenn wir nämlich der Einfachheit halber den Punkt K abgeleitet denken, so wird in Z das Potential $ZP = e$ sein wie im ersten Falle, Fig. 370 III; in A, wo die beiden Leiter zusammenstossen, wird das Potential eine Grösse $AB = v$ besitzen, welche wir nun berechnen wollen. Wir finden zunächst für die Gefälle:

Fig. 371.



$$\varepsilon = \frac{e - v}{l} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 2)$$

$$\varepsilon' = \frac{v}{l'} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 3)$$

Aus 1) 2) und 3) folgt:

$$v = e \frac{\frac{l'}{q'\lambda'}}{\frac{l}{q\lambda} + \frac{l'}{q'\lambda'}} = e \frac{r'}{r + r'} \quad \ldots \ldots \quad 4)$$

Nun berechnen wir noch die Stromstärke als Product aus Gefälle, Querschnitt und Leitungsvermögen.

Wir finden für den Leiter AK:

$$i = \varepsilon' q' \lambda' = \frac{v}{l'} \cdot q' \lambda' = \frac{v}{r'} = \frac{e}{r + r}.$$

Dasselbe muss herauskommen für die Stromstärke in dem Leiter ZA, nämlich:

$$i = \varepsilon q \lambda = \frac{e - v}{l} q \lambda = \frac{e - v}{r} = \frac{e - \frac{e r'}{r + r'}}{r} = \frac{e}{r + r'}.$$

Es ist also auch in diesem Falle die Stromstärke gleich der elektromotorischen Kraft e, dividirt durch den Gesammtwiderstand $r + r'$, wie es das Gesetz von Ohm ausspricht. Wir können nun leicht eine einfache Constructionsregel ableiten, um die Potentialhöhe v an der Verbindungsstelle A der beiden Leiter graphisch zu ermitteln. Wir ersetzen die Länge $AK = l$ durch eine andere l'', die wir so wählen, dass sie der Bedingung:

$$\frac{l''}{q\lambda} = \frac{l'}{q'\lambda'}$$

entspricht. Das heisst, wir denken uns den Leiter AK durch einen anderen AK' ersetzt, dessen Widerstand gleich gross wie der von AK, dessen Querschnitt und Leitungsvermögen aber den gleichen Werth haben, wie in dem andern Leitungsstück ZA. Offenbar verhalten sich dann die Leiterlängen wie ihre Widerstände also:

$$l'' : l = r' : r,$$

also auch:

$$l'' : l'' + l = r' : r + r'.$$

Um die Ordinate $AB = v$ zu erhalten, brauchen wir dann nur den Endpunkt in K' mit dem Punkte P durch eine Gerade zu verbinden. Die Senkrechte in A bis zum Schnittpunkte B ist dann das gesuchte v, denn aus der Aehnlichkeit der Dreiecke $AK'B$ und $ZK'P$ folgt:

$$v:e = l'':l'' + l$$
$$= r':r' + r,$$

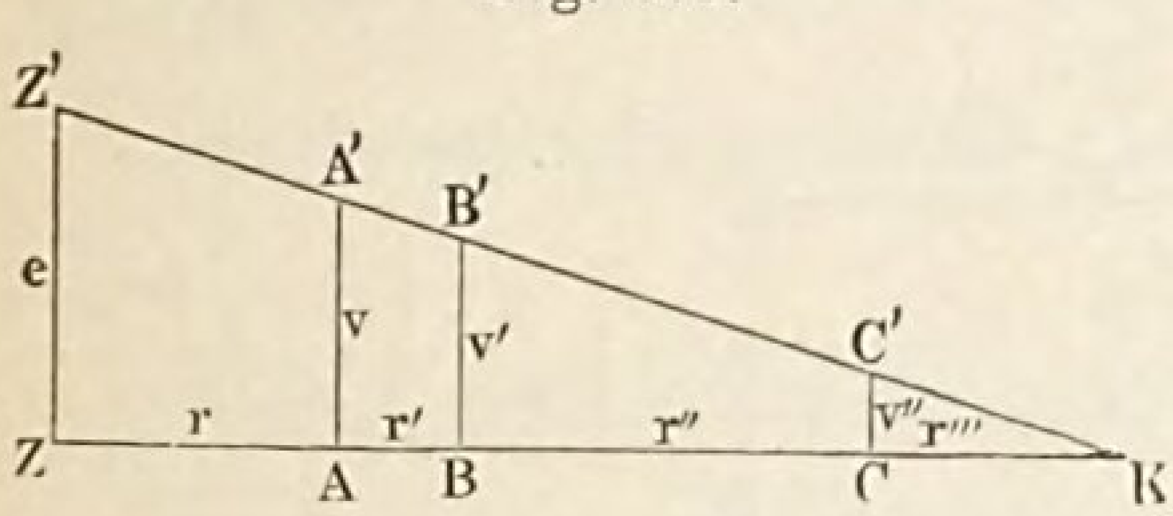
endlich:

$$v = e\,\frac{r'}{r + r'},$$

wie oben unter 4) berechnet wurde.

Dieses Verfahren kann begreiflicherweise auf eine beliebige Zahl auf einander folgender Leiter angewendet werden. Man substituirt den wirklichen Längen der einzelnen Leiter ihre reducirten Längen oder Widerstände, indem man jede Länge des einzelnen Leiters durch das Product seines specifischen Leitungsvermögens mit seinem Querschnitte dividirt. Die so erhaltenen reducirten Längen r, r', r'', r''' werden auf einer Abscissenaxe (Fig. 372) aufgetragen, so dass die Stelle der elektromotorischen Kraft an das Ende bei Z zu liegen kommt, daselbst eine Ordinate e gleich dieser elektromotorischen Kraft errichtet, und die Gerade $Z'K$ gezogen. Die Ordinaten v, v' v'' stellen dann die Potentialhöhen an den Punkten A, B, C vor, wo die Leiter zusammenstossen, für den Fall, dass der Punkt K abgeleitet wird. Hat K selbst ein Potential, so ist dasselbe zu allen übrigen zu addiren.

Fig. 372.



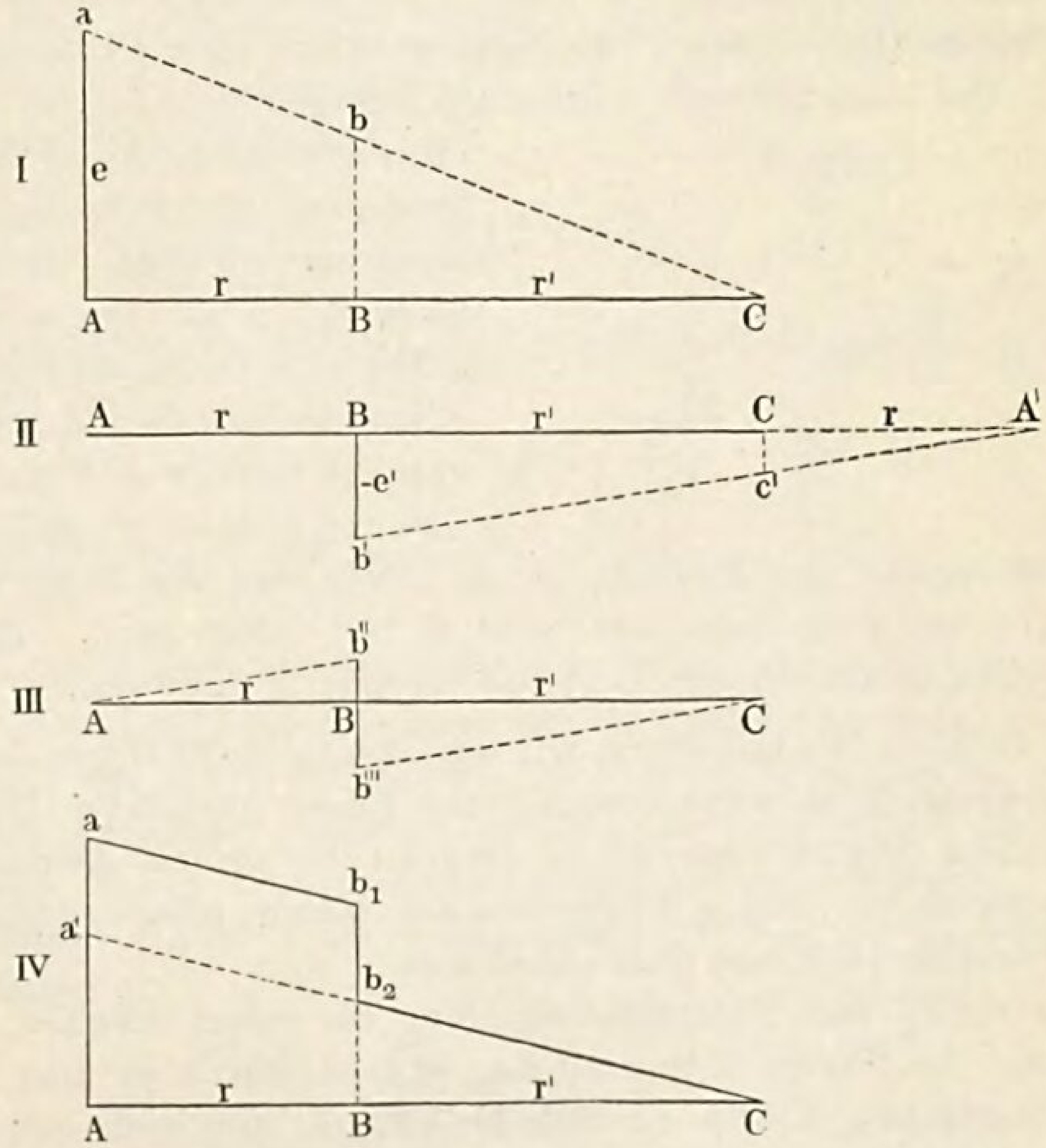
Als dritten Fall wollen wir nun jenen betrachten, bei welchem der Stromkreis durch zwei verschiedene Leiter gebildet wird, welche an ihren beiden Berührungsstellen verschieden grosse elektromotorische Kräfte entwickeln. Diese Kräfte können gleich- oder entgegengerichtet sein; wir wollen letzteren Fall annehmen.

Man erhält das Potentialdiagramm für einen solchen Stromkreis, indem man die Potentialdiagramme, welche durch je eine der beiden elektromotorischen Kräfte zu Stande kämen, für sich construirt und dann die algebraische Summe der Ordinaten bildet. Die so erhaltenen Ordinaten liefern das Potentialdiagramm des ganzen Systems.

Es seien AB und BC (Fig. 373 I, a. f. S.) die beiden reducirten Längen (Widerstände r und r') der Leiter; bei A sei eine elektromotorische Kraft $Aa = e$, bei B (Fig. 373 II) die entgegengesetzte elektromotorische Kraft $Bb' = -e'$ thätig. Wir construiren zuerst nach den obigen Regeln die Fig. 373 I, wodurch wir die Potentialhöhe in $B = Bb$ erhalten. Dann construiren wir Fig. 373 II, indem wir zunächst das Leiterstück AB an das andere Ende gezeichnet denken, so dass die elektromotorische Kraft $-e'$ an das linksseitige Ende bei B zu stehen kommt. Die gestrichelte Linie $b'\,c'\,A'$ liefert dann die betreffenden Potentialhöhen. Nun denken wir uns das Stück CA' wiederum an die andere Seite zurückübertragen und ausserdem die Potentiallinie parallel zu sich selbst

so weit erhöht, dass sie durch A und C hindurchgeht, wie in Fig. 373 III ausgeführt erscheint. Jetzt combiniren wir Fig. 373 I mit III, indem wir die Potentialhöhen mit Rücksicht auf das Zeichen addiren. So erhalten wir die Fig. 373 IV, in welcher die gebrochene Linie $a b_1 b_2 C$ die definitive Potentiallinie für den Fall darstellt, dass C abgeleitet wurde. Um daraus die Linie des Gefälles zu erhalten, brauchen wir nur mehr statt der Längen r und r' die ursprünglichen nicht reducirten Längen zu zeichnen, die gefundenen Potentialhöhen dazu aufzutragen und durch Gerade zu verbinden.

Fig. 373.



Der Anblick der Fig. 373 IV zeigt uns aber sofort, dass wir auf kürzerem Wege zum Ziele gelangen können. Offenbar ist, wenn wir die Gerade Cb_2 bis a' verlängern, $Aa' = Aa - b_1 b_2 = e - e'$, also gleich der abgebraischen Summe der in der Kette vorhandenen elektromotorischen Kräfte. Tragen wir diese Summe im Punkte A als Ordinate Aa' auf und ziehen $a'C$, so erhalten wir sofort das Stück $b_2 C$ der Potentiallinie, und ziehen wir von a dazu die Parallele ab_1, so bekommen wir das andere Stück dazu.

Da die Abscissen in dieser Construction den Widerständen, die Ordinaten den Potentialhöhen entsprechen, so muss die trigonometrische Tangente des Neigungswinkels der Potentiallinie gleich der Stromstärke sein. So wie letztere im ganzen Stromkreis constant ist, muss demnach

auch jener Neigungswinkel überall derselbe, also die Theile der Potentiallinie unter einander parallel sein.

Wir wollen übrigens die Stromstärke auch noch durch Rechnung finden.

Aus Fig. 373 I ergiebt sich:

$$Bb = e\,\frac{r'}{r + r'}.$$

Aus Fig. 373 III: $Bb'' : Bb''' = r : r'$

$Bb'' : Bb'' + Bb''' = r : r + r'$, also da $Bb'' + Bb''' = e'$

$$Bb'' = e'\,\frac{r}{r + r'}.$$

Aus Fig. 373 IV: $Bb_1 = Bb + Bb'' = e\,\dfrac{r'}{r + r'} + e'\dfrac{r}{r + r'} = \dfrac{er' + e'r}{r + r'}$.

Die Stromstärke im Leiter r ist demnach:

$$i = \frac{Aa - Bb_1}{r} = \frac{e - \dfrac{er' + e'r}{r + r'}}{r} = \frac{e - e'}{r + r'}.$$

Auf analoge Weise findet man:

$$Bb''' = e'\,\frac{r'}{r + r'},$$

$$Bb_2 = Bb - Bb''' = e\,\frac{r'}{r + r'} - e'\,\frac{r'}{r + r'} = \frac{(e - e')\,r'}{r + r'}.$$

Also die Stromstärke im Leiter r':

$$i = \frac{Bb_2}{r'} = \frac{e - e'}{r + r'},$$ wie oben im Leiter r.

$e - e'$ ist die algebraische Summe der elektromotorischen Kräfte, $r + r'$ die Summe der Widerstände. Wir kommen also bezüglich der Stromstärke in einem Schliessungskreise, in welchem sich mehrere Widerstände und elektromotorische Kräfte vorfinden, zu folgender allgemeineren Fassung des Ohm'schen Gesetzes: Die Stromstärke ist gleich der algebraischen Summe sämmtlicher im Stromkreise thätiger elektromotorischer Kräfte, dividirt durch die Summe sämmtlicher Widerstände.

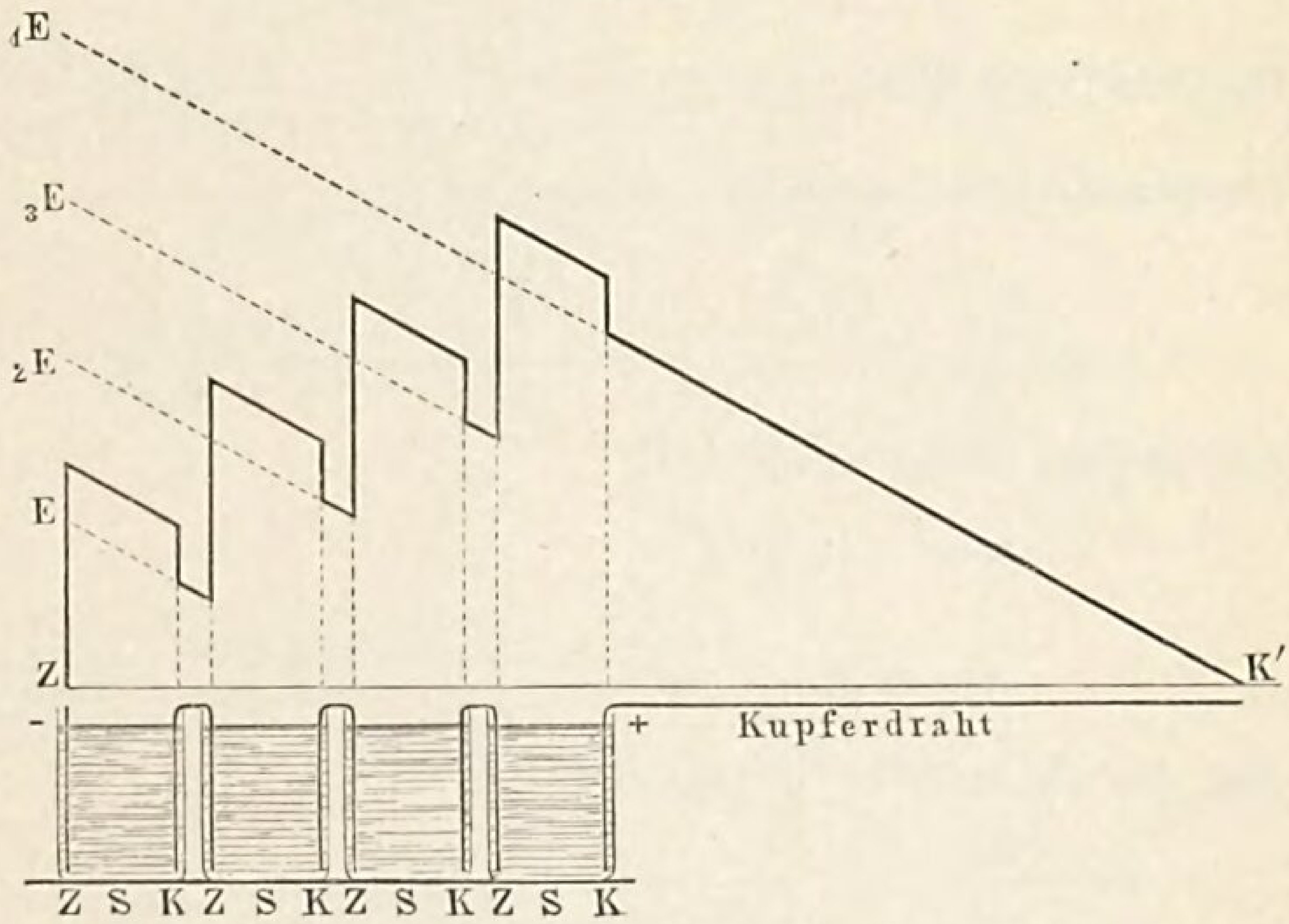
Will man für solche complicirtere Fälle, wo mehrere Leiter und elektromotorische Kräfte auftreten, die Potentiallinie construiren, so ergeben sich aus Obigem folgende Constructionsregeln:

1. Man ersetzt zunächst alle Leiterlängen durch ihre Widerstände und trägt die letzteren der Reihe nach auf einer Abscissenaxe an einander stossend auf.
2. Man rechnet alle elektromotorischen Kräfte, welche den positiven Strom nach rechts treiben, positiv, die entgegengesetzten negativ,

und bildet die algebraische Summe derselben, welche man in Form einer Ordinate am einen Ende der Leiterreihe mit Rücksicht auf ihr Zeichen aufträgt.

3. Man verbindet das Ende dieser Ordinate mit dem anderen Ende der Horizontalen durch eine schiefe Gerade.
4. Man errichtet an allen Punkten, wo elektromotorische Kräfte auftreten, Ordinaten.
5. Man zieht von jenem Punkte der Leiterreihe, welchen man sich abgeleitet denkt, eine, zu der schiefen Geraden, Parallele bis zur nächsten Ordinate, trägt an derselben vom Schnittpunkte aus die Grösse der dortigen elektromotorischen Kraft mit Rücksicht auf ihr Zeichen auf und geht vom anderen Ende der aufgetragenen Strecke wieder parallel mit der schiefen Geraden fort, bis man die nächste Ordinate trifft. So fährt man fort, bis alle Ordinaten durch solche schiefe Parallelen verbunden sind.

Fig. 374.



Als Beispiel einer solchen Construction ist in der Fig. 374 das Potentialdiagramm einer geschlossenen vierelementigen Kupfer-Zinkbatterie ausgeführt. Es ist dabei angenommen, dass die Abscissen den Widerständen proportional seien, dass der Widerstand der Verbindung je zweier Elemente ungefähr $= \frac{1}{3}$ des Widerstandes der Flüssigkeiten und jener des äusseren Schliessungsdrahtes ebenso gross, wie jener der Batterie sei. Es ist ferner angenommen, dass an der Berührung von Kupfer mit Säure eine elektromotorische Kraft auftrete, welche entgegengesetzt, aber kleiner als jene sei, welche an der Berührungsfläche des Zinks mit der Säure auftritt*).

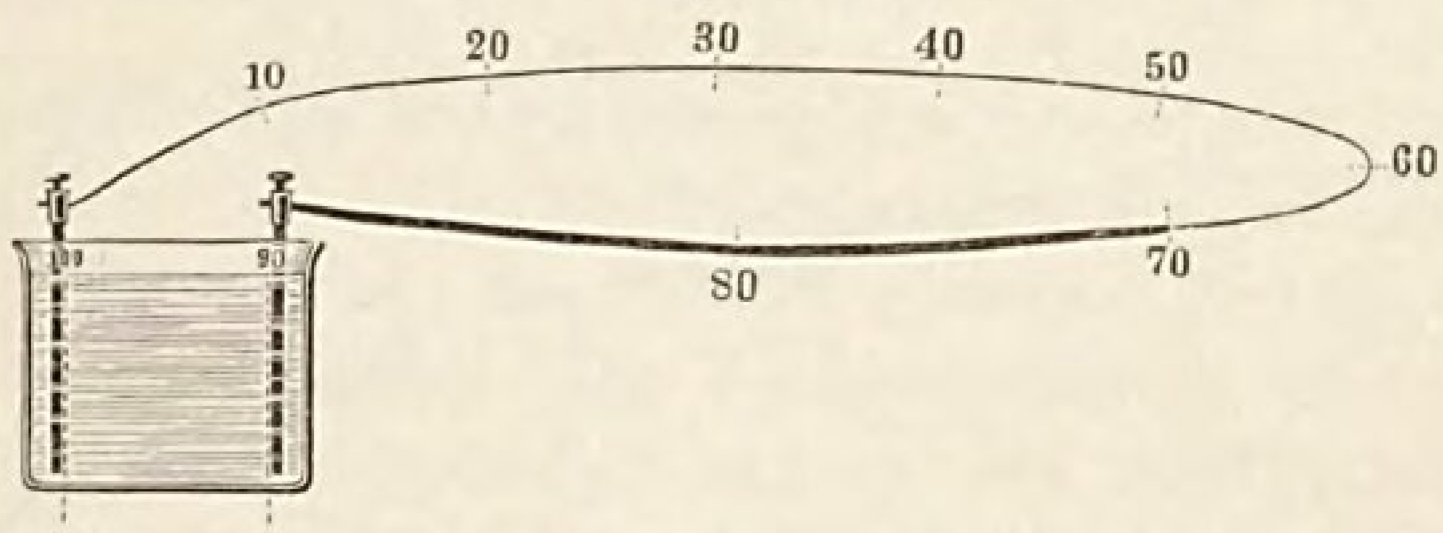
*) Siehe die Anmerkung auf Seite 360.

Bestätigungen des Ohm'schen Gesetzes und Folgerungen aus demselben. Die in §. 124 angeführten Versuche zum experimentellen Nachweise des Ohm'schen Gesetzes entbehren, wie bereits erwähnt, der wünschenswerthen Genauigkeit. Der strenge Nachweis seiner Gültigkeit ergiebt sich aus dem Eintreffen aller Folgerungen, die man aus demselben ableiten kann. 134

Nachdem wir inzwischen die Maasse der Widerstände und die Umstände, welche auf diese Einfluss nehmen, kennen gelernt haben, können wir weitere Versuche zur Bestätigung des Ohm'schen Gesetzes besprechen.

Wir nehmen ein Volta'sches Element, an welchem wir der Einfachheit wegen annehmen, dass nur an einer Stelle eine elektromotorische Kraft auftrete, dass dieselbe rund 1 Volt betrage und dass der Widerstand der zwischen den Metallplatten befindlichen Flüssigkeit (innerer oder wesentlicher Widerstand) gerade 1 Ohm gross sei. Die Polklemmen des Elementes verbinden wir durch einen äusseren

Fig. 375.

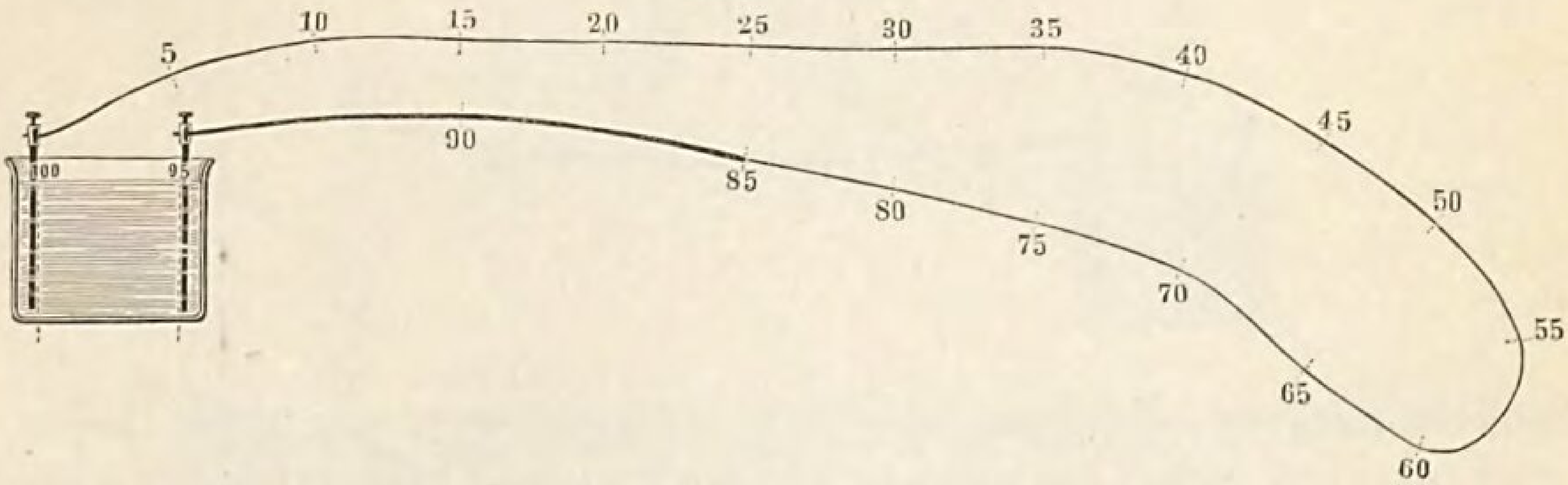


Schliessungskreis, den wir, wie Fig. 375 andeutet, aus zwei Drahtstücken, einem dicken kürzeren und einem längeren dünneren zusammensetzen. Der dickere mag z. B. ein Neusilberdraht von $^1/_5$ qmm Querschnitt und 2 m Länge, der dünnere ein ebensolcher von $^1/_{10}$ qmm Querschnitt und 7 halben Metern Länge sein. Es hat dann, da das specifische Leitungsvermögen des Neusilbers laut Tabelle S. 421 = 5 ist, der dickere Draht per Meter 1 Ohm Widerstand, der dünne per Meter 2 Ohm, also per $^1/_2$ m auch 1 Ohm Widerstand. Denken wir uns, wie in Fig. 375 angedeutet ist, den dicken Draht in Theile von 1 m Länge, den dünnen Draht in solche von $^1/_2$ m Länge eingetheilt, so zerfällt der ganze äussere Schliessungskreis in 9 Abtheilungen von je 1 Ohm Widerstand, so dass also der Gesammtwiderstand inclusive der Flüssigkeit 10 Ohm beträgt. Bringen wir das Zink auf das Potential Null, so hat die angrenzende Flüssigkeit an der Berührungsstelle das Potential 1 Volt. Setzen wir dieses Potential = 100, d. h. messen wir nach Hundertel Volt, so muss nach den Erörterungen des vorigen Paragraphen diese Potentialhöhe, wenn wir dem Schliessungskreise entlang gehen, jedesmal um den zehnten Theil abnehmen, so oft wir ein Zehntel des Gesammtwiderstandes durchschritten haben. Die Figur giebt daher ein Bild des Verlaufes der Potentialhöhen, welche den verschiedenen Punkten beigeschrieben sind. Je besser leitend an einer Stelle der Schliessungskreis ist, desto weiter

rücken daselbst die Punkte gleicher Potentialdifferenz aus einander, d. h. desto kleiner ist daselbst das Stromgefälle. Von der benetzten Oberfläche der Platten bis zu ihren Klemmschrauben ist der Widerstand meist so gering, dass er gleich Null gesetzt werden kann. So z. B. würde der Widerstand einer Kupferplatte von 10 cm Breite, 20 cm Länge und 1 mm Dicke der ganzen Länge nach nur $\frac{0{,}015}{100\,.\,5} = 0{,}00003$ Ohm betragen. Wir können daher in der Regel unbedenklich annehmen, dass auch an der geschlossenen Kette das Potential der Polklemmen mit jenem der benetzten Metallflächen übereinstimme. Hat also die Klemme am negativen Pole das Potential Null, die sie benetzende Flüssigkeitsschichte in Folge der elektromotorischen Kraft das Potential 100, so beträgt es auf der positiven Polklemme in unserem Beispiele nur mehr 90, da zwischen beiden $^1/_{10}$ des ganzen Widerstandes enthalten ist.

Bezeichnen wir allgemein die elektromotorische Kraft mit E, den Gesammtwiderstand mit R, welcher sich aus dem Widerstande innerhalb

Fig. 376.



des Elementes w und dem ausserhalb desselben r zusammensetzt, so dass also $R = w + r$, so erhält man die Potentialdifferenz der Polklemmen:

$$K = E\,\frac{r}{R} = E\left(1 - \frac{w}{R}\right).$$

Diese Grösse heisst man gewöhnlich die Klemmspannung des Elements. Die Potentialdifferenz für die Enden irgend eines Stückes des Schliessungskreises, zwischen denen keine elektromotorische Kraft thätig ist, ergiebt sich, wenn der Widerstand des Leiterstückes $= \varrho$ ist, gleich:

$$E\,\frac{\varrho}{R}.$$

Um diese Folgerungen durch Messungen zu bestätigen, können wir das Thomson'sche Quadrantenelektrometer (§. 71) benutzen. Wäre dasselbe so adjustirt und geladen, dass der Potentialdifferenz 1 Volt ein Scalenausschlag von 100 Theilen entspräche, so müssten wir 90 Scalentheile Ausschlag erhalten, wenn wir die Zuleitungsdrähte des Elektrometers an die Polklemmen anlegen würden, während dieselben, wie in Fig. 375, durch einen Schliessungsdraht von 9 Ohm Widerstand ver-

bunden sind. Der Anlegung der Zuleitungsdrähte an die Endstellen des dicken Drahtes bei 90 und 70 würde ein Ausschlag von 20 Scalentheilen, der Anlegung an den Endstellen 0 und 70 des dünnen Drahtes ein solcher von 70 Scalentheilen entsprechen.

Diese Potentialdifferenzen, also auch die Klemmspannung, ändern sich aber sofort, sobald wir den Schliessungskreis in seinem Widerstande ändern.

Wir schalten beispielsweise, wie in Fig. 376 angedeutet ist, noch 5 m des dünneren Drahtes hinzu. Wir haben dann die Widerstände:

Flüssigkeit		1 Ohm
2 Meter dicker Draht		2 „
17 halbe Meter dünner Draht . . .		17 „
Gesammtwiderstand	$R =$	20 Ohm
Aeusserer Widerstand	$r =$	19 „
Innerer Widerstand	$w =$	1 „

Die Potentialdifferenz wird diesmal per Ohm $= \frac{100}{20} = 5$ der gewählten Einheiten. Mit Verdoppelung des Gesammtwiderstandes durch Einschaltung eines neuen Drahtstückes rücken also auch auf den vorher vorhandenen Drahtstücken die Punkte gleicher Potentialdifferenz noch einmal so weit aus einander. Die Klemmspannung wird diesmal = 95 Hundertel Volt, die Potentialdifferenz an den Enden des unverändert gebliebenen dicken Drahtes wird = 10 Hundertel Volt, wie sich durch die ebenso grossen Scalenausschläge am Elektrometer bestätigen liesse.

Würde man nun den äusseren Widerstand r immer mehr vergrössern, so würde, wie aus dem Ausdrucke für die Klemmspannung:

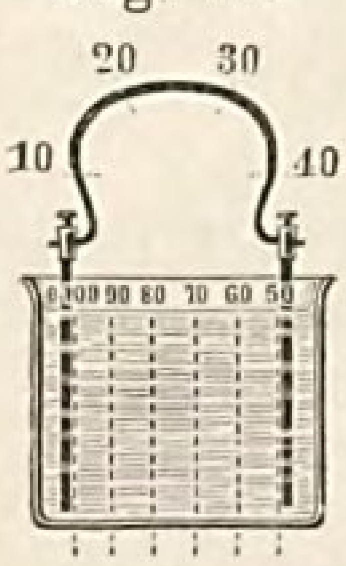
$$K = E\frac{r}{R} = E\frac{r}{r+w} = E\cdot\frac{1}{1+\frac{w}{r}}$$

hervorgeht, $\frac{w}{r}$ immer mehr der Null sich nähern und die Klemmspannung der Grösse der elektromotorischen Kraft immer näher kommen. Für $r = \infty$, d. h. wenn wir die Kette ganz öffnen, wird $K = E$. Die Potentialdifferenz an den Klemmen der offenen Kette ist dann im Maximum gleich der elektromotorischen Kraft, wie es auch sein muss, da dann das Potentialgefälle ganz verschwunden ist. Ebenso würde die Klemmspannung der elektromotorischen Kraft sich nähern, wenn man den inneren Widerstand w verkleinerte, z. B. die Platten sich nähern würden.

Die Fig. 377 (a. f. S.) endlich stellt den Fall vor, wo wir den äusseren Widerstand bis auf 1 Ohm verkleinert haben. Hier ist also $w = 1$, $r = 1$, $R = 2$. Die Potentialdifferenz 100 vertheilt sich auf 2 Ohm, es trifft also auf 1 Ohm die Potentialdifferenz 50; theilen

wir sowohl die Flüssigkeitssäule als den Schliessungsdraht in je 5 gleiche Theile, so ändert sich von Theilpunkt zu Theilpunkt das Potential um 10 Hundertel Volt. Die Klemmspannung wird $= E\,\frac{r}{R} = \frac{1}{2}\,E.$

Fig. 377



Ersetzen wir den Schliessungsdraht nach und nach durch immer kürzere und dickere Drähte, so wird r nahe = Null, die Klemmspannung ebenfalls nahe = Null.

Was diese Versuche etwas erschwert, ist der Umstand, dass die elektromotorische Kraft E selbst selten ganz constant bleibt, wenn die Stromstärke sich ändert, weil diese auf die Beschaffenheit der Plattenoberfläche und die Zusammensetzung der Flüssigkeit Einfluss hat.

Eine andere Reihe von Folgerungen aus dem Ohm'schen Gesetze erhalten wir für die Zusammensetzung mehrerer Elemente hinter oder neben einander.

Wir bezeichnen wiederum mit R den gesammten, mit r den äusseren, mit w den inneren oder wesentlichen Widerstand des Elementes, mit E seine elektromotorische Kraft. Für die Stromstärke eines einzigen Elementes gilt dann:

$$J = \frac{E}{w + r} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

Sind nun mehrere, z. B. n Elemente, deren jedes die elektromotorische Kraft E und den wesentlichen Widerstand w besitzt, hinter einander zu einer Batterie zusammengesetzt und die beiden Pole durch einen Schliessungsbogen von dem Widerstande r verbunden, so wird die Stromstärke

$$J' = \frac{n\,E}{n\,w + r} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

Der Einfluss, welchen die Vermehrung der Plattenpaare, also die Vergrösserung von n, auf die Stromstärke ausübt, hängt nun sehr von der Grösse des Widerstandes r im Schliessungsbogen ab. Wir wollen hier nur die extremen Fälle betrachten.

Wenn der Schliessungsbogen nur durch ganz kurze, dicke und gut leitende Metalldrähte gebildet wird, so ist r sehr klein. Für den Fall, dass r verschwindend klein ist im Vergleich zum wesentlichen Widerstande w, reducirt sich aber Gleichung 2) auf

$$J' = \frac{n\,E}{n\,w} = \frac{E}{w},$$

d. h. die Stromstärke, welche eine Säule von n Plattenpaaren liefert, ist nicht grösser als die eines einzigen Plattenpaares. Wenn also der Widerstand im Schliessungsbogen klein ist im Vergleich zu dem Leitungswiderstande eines einzelnen Elementes, so gewährt die Vermehrung der hinter einander combinirten Plattenpaare keinen Vortheil.

Ist dagegen der Widerstand r bedeutend, so wächst der Werth des Bruches 2) mit der Grösse von n; für den Grenzfall, dass r gross genug ist, um dagegen nw vernachlässigen zu können, geht der Werth von J über in

$$J'' = \frac{nE}{r};$$

die Stromstärke ist also hier der Anzahl n der Plattenpaare proportional. Sobald also der Leitungswiderstand im Schliessungsbogen bedeutend ist, wird durch Vermehrung der hinter einander combinirten Plattenpaare eine Vergrösserung der Stromstärke erzielt.

Betrachten wir nun den Einfluss, welchen die Vergrösserung der Oberfläche eines einfachen Plattenpaares hat. Die Stromstärke für ein einziges Plattenpaar wurde oben mit

$$J = \frac{E}{w + r}$$

bezeichnet; wenn nun die Oberfläche des Volta'schen Elementes nmal so gross würde, ohne dass sonst etwas geändert wird, so hätte dies doch nur zur Folge, den Leitungswiderstand zwischen den Platten selbst nmal kleiner zu machen, weil ja der Querschnitt der Flüssigkeit, durch welche der Strom hindurchgehen muss, nmal grösser geworden ist; statt des Widerstandes w hätte man also jetzt $\frac{w}{n}$, die Stromstärke würde also sein:

$$J' = \frac{E}{\frac{w}{n} + r},$$

oder, was dasselbe ist:

$$J' = \frac{nE}{w + nr}.$$

Wäre r, d. h. der Leitungswiderstand im Schliessungsbogen, gleich Null, so wäre die Stromstärke der Oberfläche des Elementes proportional; dies ist auch noch sehr nahe der Fall, wenn r nur sehr klein ist; eine Vergrösserung der Oberfläche bringt also nur dann eine proportionale Vermehrung der Stromstärke hervor, wenn der Leitungswiderstand im Schliessungsbogen klein ist gegen den wesentlichen Widerstand im Element.

Alle diese Folgerungen aus dem Ohm'schen Gesetze lassen sich leicht mit Hülfe einer Tangentenbussole und eines Rheostaten bestätigen.

Zweckmässigste Combination einer gegebenen Anzahl von Volta'schen Elementen. Aus dem Ohm'schen Gesetze haben wir im vorigen Paragraphen die Folgerung abgeleitet, dass 135

je nach der Grösse des äusseren Widerstandes entweder die Vermehrung oder die Vergrösserung der Platten die Stromstärke erhöht. Denselben Zweck, wie durch die Vergrösserung der Platten, kann man aber auch durch Verbindung der Elemente neben einander erreichen. Setzt man z. B. bei zwei Daniell'schen Elementen das Zink mit dem Zink und das Kupfer mit dem Kupfer in Verbindung, so erhält man eine Combination, die ebenso wirkt, wie ein einziges Element von doppelter Grösse der Platten. Das Ohm'sche Gesetz gestattet uns nun, folgenden wichtigen Satz abzuleiten:

Das Maximum der Stromstärke erhält man von einer gegebenen Anzahl galvanischer Becher, wenn man sie so ordnet, dass der wesentliche Widerstand in der Batterie dem Widerstande im Schliessungsbogen gleich ist.

Dieser Satz soll erst erläutert, dann bewiesen werden.

Wir haben bereits oben (§. 118) gesehen, dass man eine bestimmte Anzahl galvanischer Becher in verschiedener Weise combiniren kann, so dass sie bald eine Säule von vielen, aber kleineren, bald eine solche von wenigen, aber grösseren Plattenpaaren darstellt. Für jede dieser Combinationen ist natürlich auch der Gesammtwiderstand ein anderer. Bezeichnen wir den Leitungswiderstand eines einzelnen Bechers mit 1, so ist der Gesammtwiderstand der Combination, Fig. 378, gleich 8; der Widerstand der Combinationen Fig. 379 bis 381 ist dann der Reihe nach 2, $^1/_2$ und $^1/_8$. Eine Anzahl von 24 Bechern kann man auf acht verschiedene Arten combiniren, nämlich:

1) Zu einer Säule von 24 einzelnen Bechern,
2) „ „ „ „ 12 doppelten „
3) „ „ „ „ 8 dreifachen „
4) „ „ „ „ 6 vierfachen „
5) „ „ „ „ 4 sechsfachen „
6) „ „ „ „ 3 achtfachen „
7) „ „ „ „ 2 zwölffachen „
8) „ „ „ „ 1 vierundzwanzigfachen Becher.

Welche von diesen Combinationen in einem bestimmten Fall zu wählen sei, hängt vom Leitungswiderstande des Schliessungsbogens ab. Man hat diejenige Combination zu nehmen, deren Widerstand dem des gegebenen Schliessungsbogens am nächsten steht. Bezeichnen wir mit 1 den Widerstand eines Bechers, so ist der Widerstand

für die 1. Combination 24,
„ „ 2. „ 6,
„ „ 3. „ 2,666,
„ „ 4. „ 1,5,
„ „ 5. „ 0,666,
„ „ 6. „ 0,375,
„ „ 7. „ 0,166,
„ „ 8. „ 0,0416.

Ist der Widerstand des gegebenen Schliessungsbogens kleiner als 0,1 von dem Widerstande eines Elementes, so hat man die letzte Combination zu wählen, die erste aber, wenn der Leitungswiderstand des Schliessungsbogens grösser ist als der von 15 Bechern. Liegt der zu überwindende Widerstand zwischen 15 und 4,3 — zwischen 4,3 und 2 — zwischen 2 und 1,08 etc., so hat man die zweite, dritte, vierte etc. Combination zu wählen.

Der eben erläuterte Satz muss nun noch bewiesen werden.

Fig. 378.

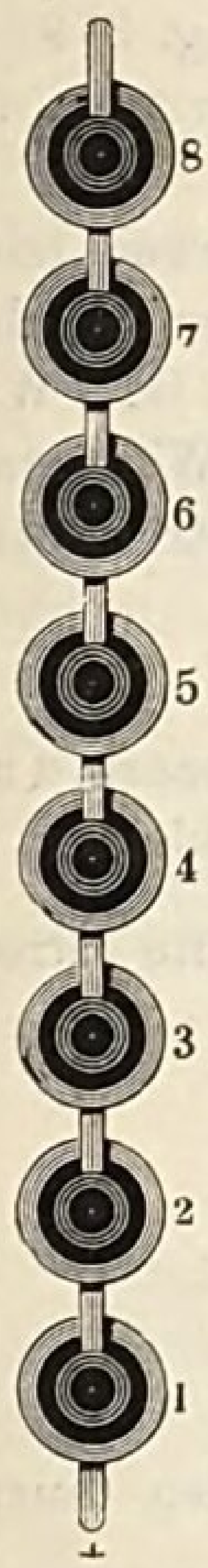


Fig. 379.

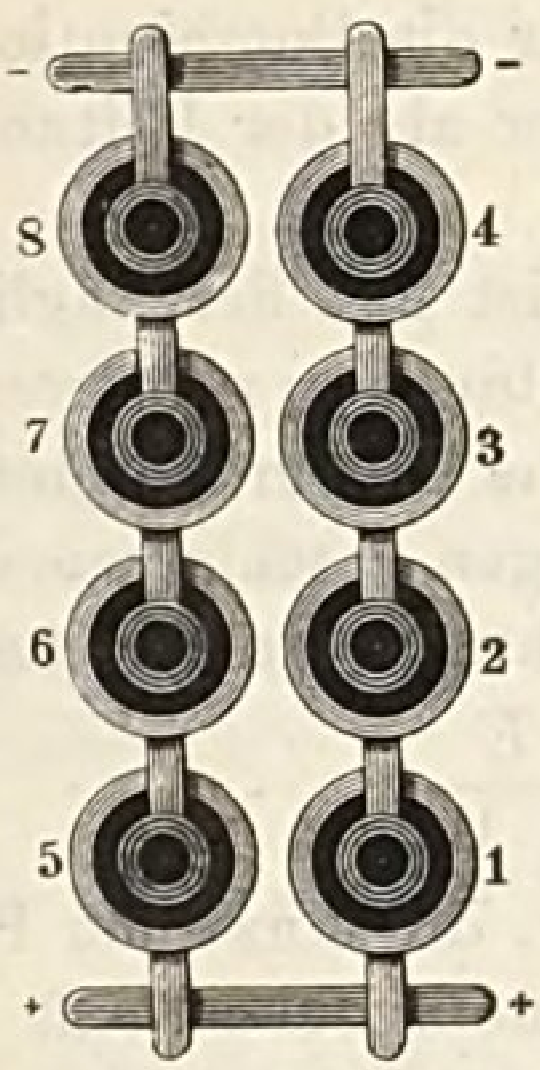


Fig. 380.

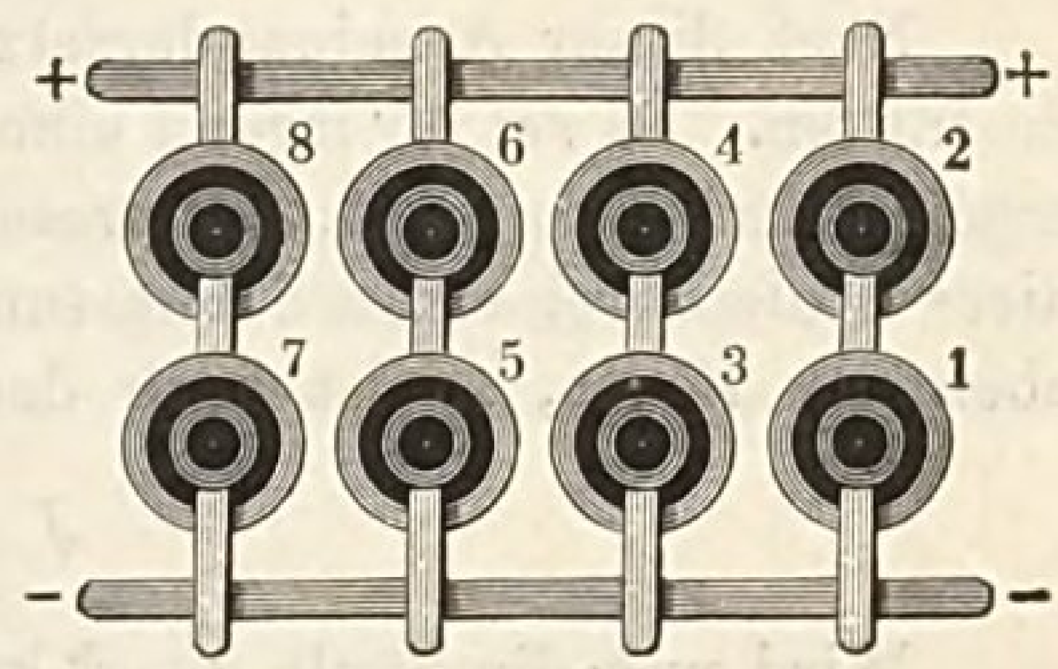
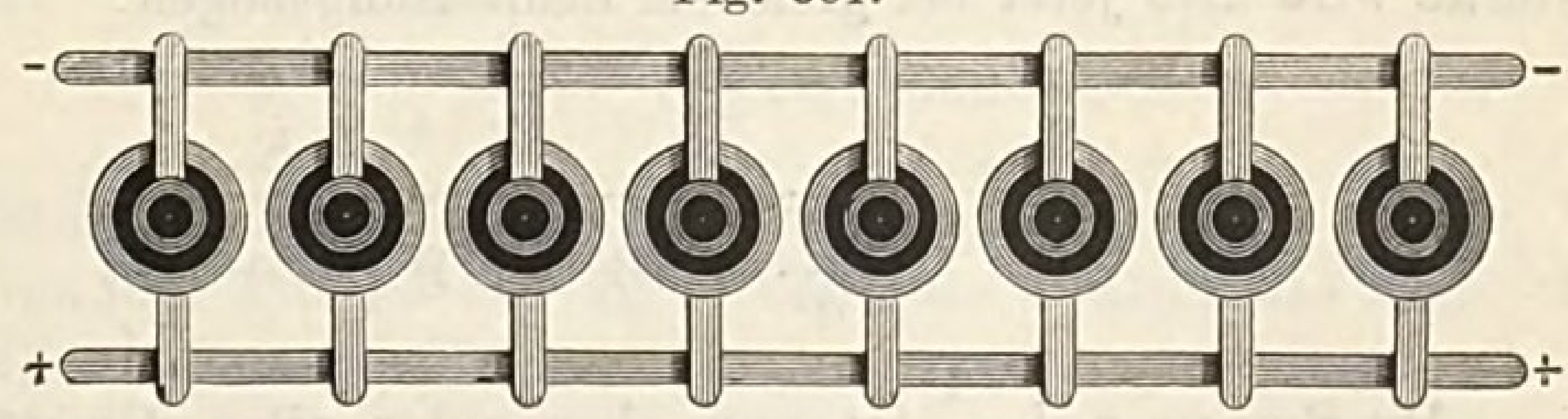


Fig. 381.



Betrachten wir die verschiedenen Combinationen von 8 Elementen, wie sie in den Fig. 378 bis 381 dargestellt sind, so übersieht man leicht, dass, wenn man die Säule verkürzt, sie in demselben Verhältniss breiter wird, d. h. wenn man weniger Becher h i n t e r e i n a n d e r setzt, so kann man bei Anwendung der gleichen Becherzahl in demselben Verhältniss mehr Elemente n e b e n e i n a n d e r setzen.

Gehen wir von der ersten Combination aus. Wir haben hier eine Säule von 8 einfachen Bechern. Reduciren wir die Länge der Säule auf die Hälfte, also auf 4, so können wir die Breite jedes Plattenpaares verdoppeln, wir haben jetzt 4 doppelte Becher, Fig. 379.

Macht man die Säule viermal kürzer, so kann man viermal so viel einzelne Becher zu einem Plattenpaare vereinigen: aus 8 einfachen

Bechern erhält man 2 vierfache, Fig. 380. Kurz, wenn man die Säule a mal kürzer macht, so kann man a mal so viel Becher zu einem Plattenpaare vereinigen.

Wenn die Zahl der hinter einander zur Säule vereinigten Becher a mal kleiner wird, so wird die elektromotorische Kraft auch a mal kleiner; hätte man nun die Säule bloss a mal kürzer gemacht, ohne ihre Breite zunehmen zu lassen, so würde auch der Leitungswiderstand a mal kleiner geworden sein; wenn aber jedes Element der einen Säule aus a mal so vielen Einzelelementen besteht als früher, so wird nun der Widerstand in der That a^2 mal kleiner als vorher.

So ist der Leitungswiderstand für die Combinationen Fig. 379 bis 381 4 mal, 16 mal und 64 mal geringer als der Leitungswiderstand der Säule Fig. 378.

Nach dieser Auseinandersetzung ist nun der fragliche Beweis leicht zu führen. Es sei für irgend eine Combination mehrerer Becher die elektromotorische Kraft E, der wesentliche Leitungswiderstand W. Wird diese Säule durch einen Schliessungsbogen geschlossen, dessen Widerstand ebenfalls W ist, so ist nach dem Ohm'schen Gesetze die Stromstärke

$$J = \frac{E}{2\,W} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

Wird nun die Säule a mal kürzer, die einzelnen Plattenpaare a mal breiter gemacht, so wird die elektromotorische Kraft a mal kleiner, sie wird $\frac{E}{a}$; der Leitungswiderstand der Kette wird aber $\frac{W}{a^2}$, die Stromstärke wird also jetzt bei gleichem Schliessungsbogen:

$$J' = \frac{\frac{E}{a}}{\frac{W}{a^2} + W} = \frac{E}{W\left(a + \frac{1}{a}\right)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

Die Summe $a + \frac{1}{a}$ ist nun aber unter allen Umständen (ausgenommen $a = 1$) grösser als 2, was für einen ganzen oder gebrochenen Zahlenwerth man auch für a setzen mag; für $a = 1$ erhält man den kleinsten Werth $= 2$, es ist also auch der Werth des Bruches 2) kleiner als der des Bruches 1). Da nun 1) den Werth der Stromstärke für den Fall bezeichnet, dass der Widerstand im Elektromotor dem Widerstande des Schliessungsbogens gleich ist, der Bruch 2) aber den Werth der Stromstärke für den Fall, dass dieselbe Anzahl von Einzelelementen auf irgend eine andere Weise combinirt ist, so ist hiermit der fragliche Satz bewiesen.

Nach diesem Satze kann man nun leicht berechnen, welche Combination in einem gegebenen Falle gewählt werden müsse.

Es seien die n disponiblen Becher so combinirt, dass sie eine Säule von s Plattenpaaren bilden, deren jedes aus t Bechern gebildet ist; mithin

ist $n = s \cdot t$. Bezeichnen wir den Widerstand eines Bechers mit w, so ist der Widerstand unserer Combination gleich $w \cdot \frac{s}{t}$. — Die Becher sollen aber so combinirt sein, dass dieser Widerstand gleich ist dem Widerstande W des gegebenen Schliessungsbogens, wir haben also

$$w \cdot \frac{s}{t} = W.$$

Da aber $t = \frac{n}{s}$, so ist auch

$$\frac{w \cdot s^2}{n} = W,$$

oder

$$s = \sqrt{\frac{Wn}{w}}.$$

Zur Erzeugung des Stromes habe man z. B. 8 Daniell'sche Becher, deren elektromotorische Kraft = 1,1 und deren Widerstand je = 15 ist. Der Schliessungsbogen sei durch ein Stück Draht gebildet, dessen Widerstand 40 ist, so haben wir

$$s = \sqrt{\frac{8 \cdot 40}{15}} = 4{,}58.$$

Es wird hier also eine Säule von 4 Doppelbechern, die Combination Fig. 379 auf Seite 452, die grösste Wirkung geben. In der That ist für diesen Fall die Stromstärke

$$J = \frac{4 \cdot 1{,}1}{4 \cdot {}^{15}/_{2} + 40} = 0{,}063.$$

Hätte man bei demselben Schliessungsbogen dieselben Becher zu einer Säule von 8 Plattenpaaren verbunden (die Combination Fig. 378 auf Seite 452), so wäre die Stromstärke nur

$$J = \frac{8 \cdot 1{,}1}{8 \cdot 15 + 40} = 0{,}055,$$

und für die Combination Fig. 381, Seite 452:

$$J = \frac{1{,}1}{{}^{15}/_{8} + 40} = 0{,}026.$$

Hat man einmal eine gegebene Anzahl von Bechern so combinirt, dass sie in einem gegebenen Schliessungsbogen ein Maximum von Stromstärke geben, so wird eine Vermehrung der Becher die Stromstärke im günstigsten Falle nur im Verhältniss der Quadratwurzel aus der Becherzahl vergrössern; man muss also 4 mal, 9 mal, 16 mal so viel Becher anwenden, um die 2 fache, 3 fache, 4 fache Wirkung zu erhalten.

Die Richtigkeit dieser Behauptung ergiebt sich aus folgender Betrachtung. Es sei der Widerstand des Schliessungsbogens gleich w,

gleich dem Widerstande eines Bechers, dessen elektromotorische Kraft mit E bezeichnet werden soll, so ist die Stromstärke

$$J = \frac{E}{w + w} = \frac{E}{2w}.$$

Die Stromstärke soll nun durch Vermehrung der Becherzahl verdoppelt werden. Soll die neue Combination ein Maximum von Effect geben, so muss der Widerstand in der Kette so gross bleiben, als der Widerstand des Schliessungsbogens, der Widerstand der neuen Combination darf also nicht grösser werden, als der eines einzigen Bechers; wir werden also die doppelte Stromstärke erhalten, wenn wir bei unverändertem Widerstande die elektromotorische Kraft verdoppeln. Die elektromotorische Kraft wird verdoppelt dadurch, dass 2 Plattenpaare hinter einander gesetzt werden; wir müssen aber 2 Doppelelemente nehmen,

Fig. 382.

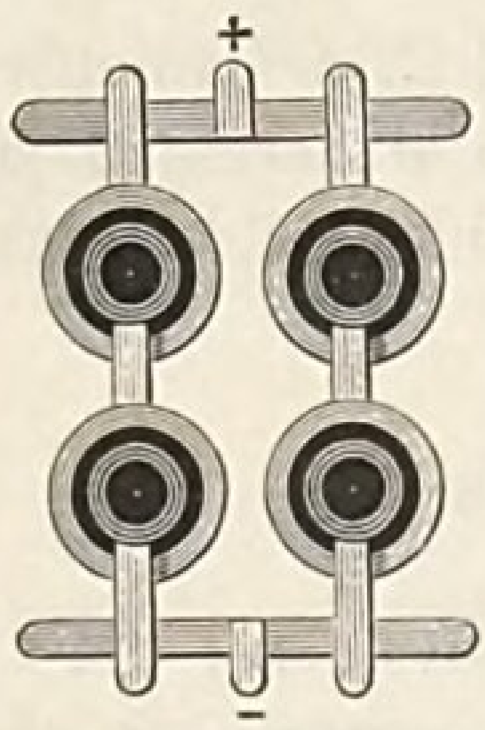
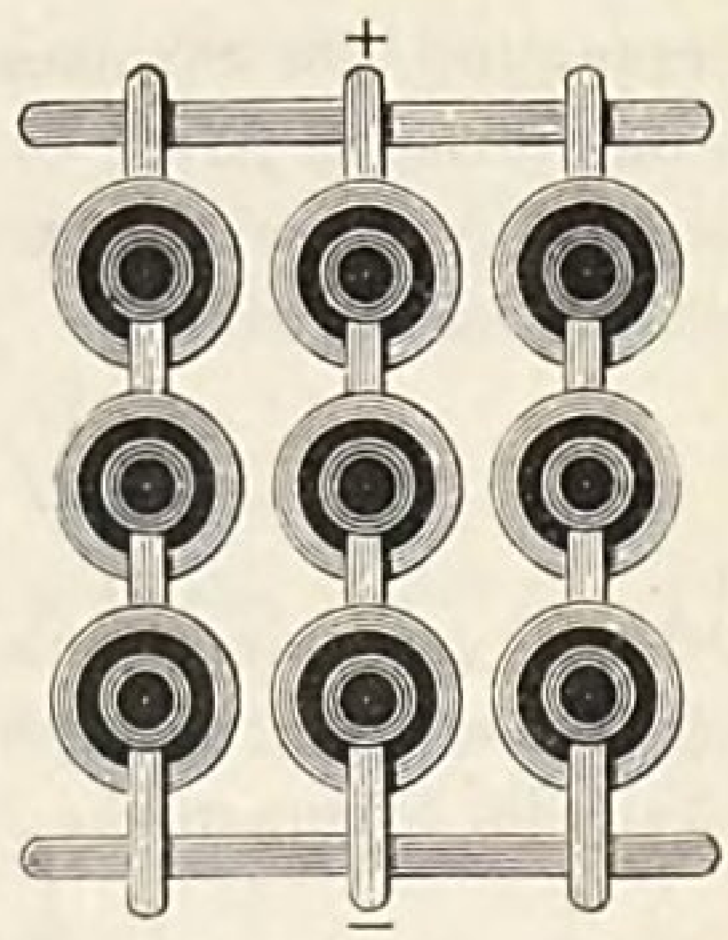


Fig. 383.



wenn ihr Widerstand ebenso gross sein soll, wie der eines einzelnen Elementes; die Combination Fig. 382 wird also eine 2 mal, die Combination Fig. 383 wird eine 3 mal so grosse Stromstärke geben, als ein einzelner Becher.

136 **Stromverzweigung, Kirchhoff's Sätze.** Wird der Stromkreis einer galvanischen Säule nicht durch eine einfache Leitung gebildet, sondern ist die Leitung verzweigt, so lassen sich dennoch die Intensitäten des Stromes in jedem einzelnen Stromzweige aus dem Ohm'schen Gesetze ableiten. Es ist dies auch dann noch möglich, wenn die Stromverzweigung nicht eine einfache, sondern eine complicirtere ist, und wenn nicht eine einzige, sondern mehrere Stromquellen in verschiedenen Zweigen verhanden sind. Dieses Problem ist schon früher von Ohm und Pouillet, später von Poggendorff und W. Weber, zuletzt aber in grösster Allgemeinheit von Kirchhoff gelöst worden.

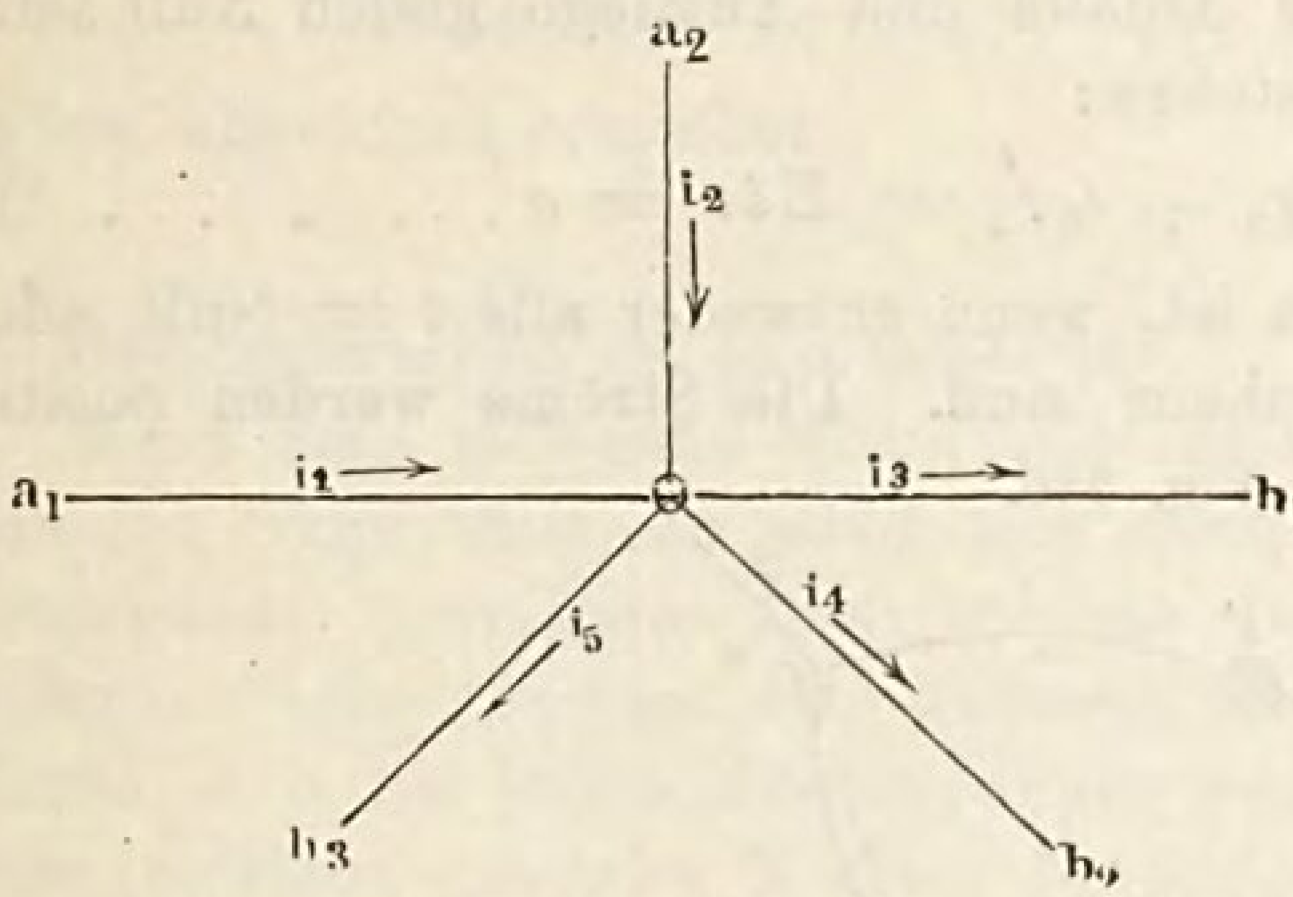
Wie Kirchhoff gezeigt hat, lassen sich nämlich alle einschlägigen Probleme mit Hülfe zweier Sätze lösen, welche lauten:

I. An jedem Knotenpunkte (Kreuzungsstelle) ist die algebraische Summe der Stromstärken gleich Null, wenn man die gegen den Knotenpunkt gerichtete und die von demselben ausgehenden Ströme mit entgegengesetztem Zeichen nimmt.

II. In jedem geschlossenen Stromkreise, der durch die Verzweigung gebildet wird, ist die Summe der elektromotorischen Kräfte gleich der Summe der Producte aus den Stromstärken mit den Widerständen der einzelnen Strecken.

Der Satz I. ist sofort einleuchtend. Es sei in Fig. 384 der Punkt o ein Knotenpunkt. Auf den Leitern $a_1 o$, $a_2 o$ seien Ströme mit den Intensitäten i_1, i_2 gegen o gerichtet, auf den Leitern $b_1 o$, $b_2 o$, $b_3 o$ ströme Elektricität mit der Stärke i_3, i_4, i_5 von o ab. Soll es nun nicht zu einer Anhäufung von Elektricität im Punkte o kommen, so muss $i_1 + i_2 = i_3 + i_4 + i_5$ oder $i_1 + i_2 - i_3 - i_4 - i_5 = o$ sein.

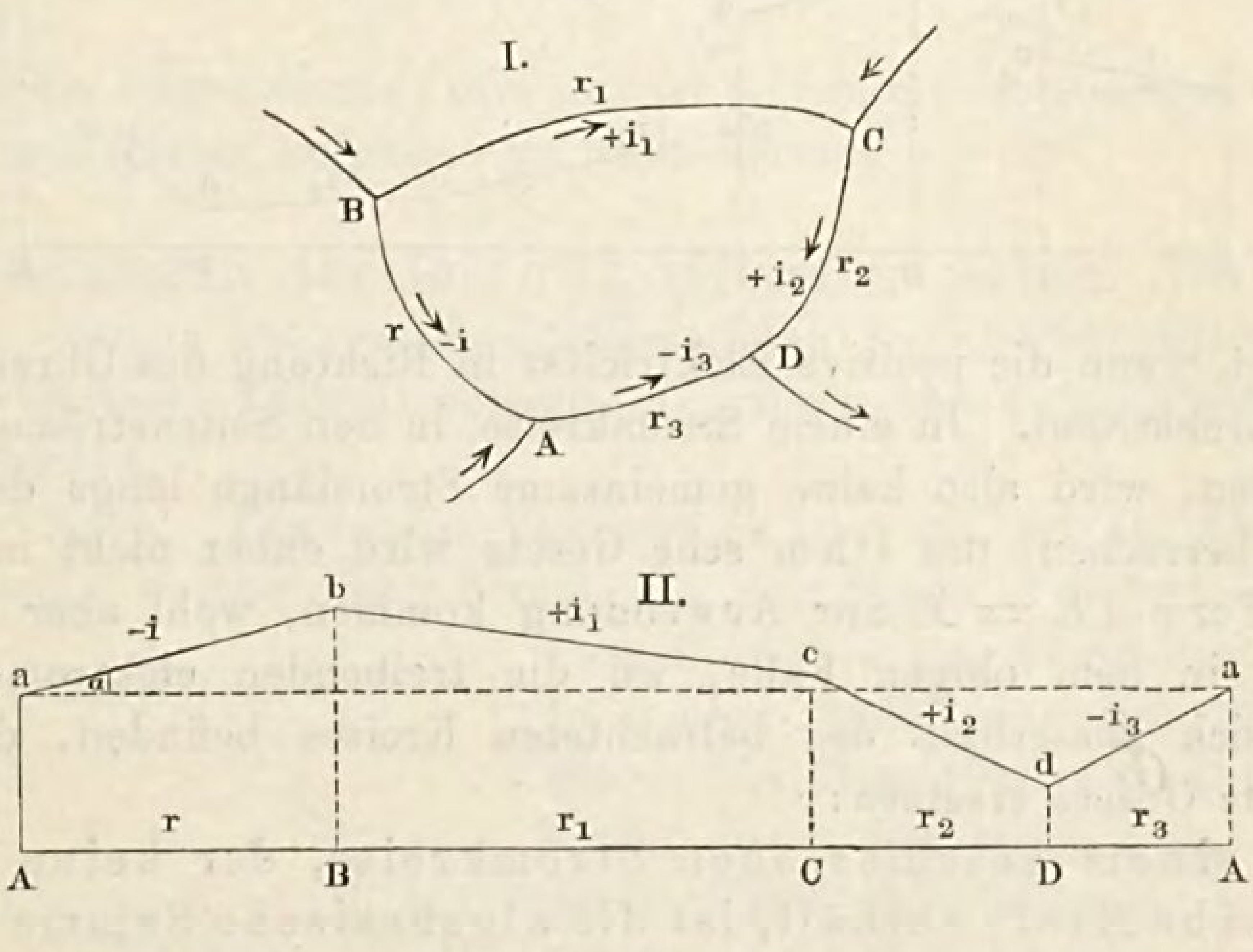
Fig. 384.



Der Satz II. ergiebt sich auf folgende Weise:

Es stelle zunächst Fig. 385 I ein Fragment eines beliebigen Netzes von Leitern dar, in welchem sich ein in sich geschlossener Kreis

Fig. 385.



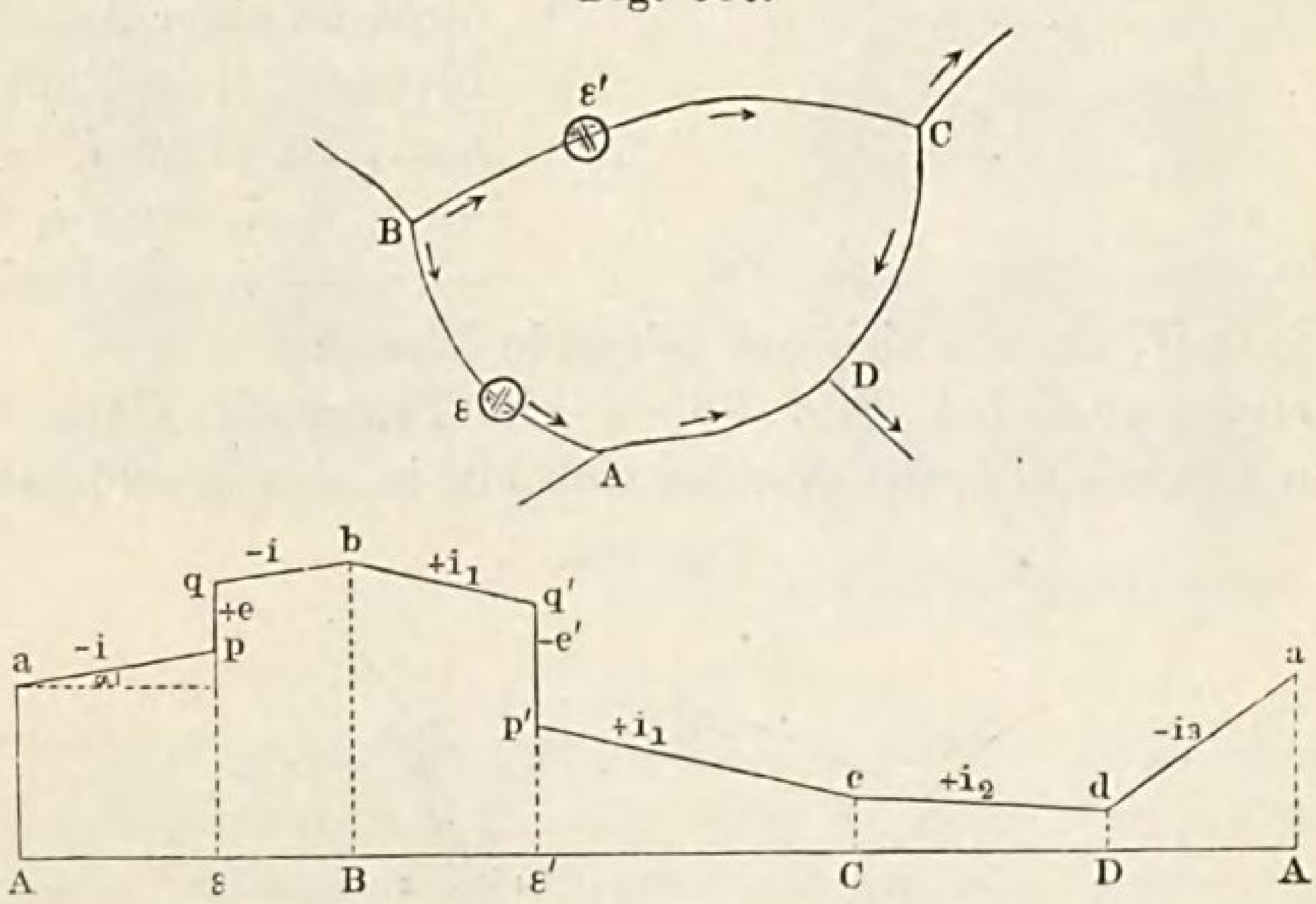
ABCDA findet, der, wie wir zunächst annehmen wollen, keine elektromotorische Kraft enthält. Die in dem Kreise vorhandenen Ströme müssen daher von aussen zugeführte und dahin abfliessende Ströme sein. Nun denken wir uns diesen Kreis bei A zerschnitten und gerad-

linig ausgestreckt (Fig. 385 II). Die Abscissenstücke *AB*, *BC* u. s. w. denken wir uns so gewählt, dass sie den Widerständen r, r_1, r_2, r_3 der Leiterstücke entsprechen. Werden in den Punkten *A*, *B*, *C*, *D*, *A* Ordinaten gleich den Potentialhöhen errichtet, so ergiebt die gebrochene Gerade *abcda* das Potentialdiagramm des Stromkreises, die trigonometrischen Tangenten der Neigungswinkel entsprechen den Stromstärken i, i_1, i_2, i_3. Die Producte ir, $i_1 r_1$, $i_2 r_2$ und $i_3 r_3$ entsprechen dann dem Abfall des Potentials von einem Knotenpunkte zum anderen, wobei ein Anstieg als negativer Abfall in Rechnung kommt. Gehen wir von *A* über *B*, *C*, *D* bis *A*, so müssen wir auf dieselbe Potentialhöhe zurückkommen, es muss daher die Summe der Abfälle und Anstiege gleich Null sein. Es muss also die Gleichung bestehen:

$$ir + i_1 r_1 + i_2 r_2 + i_3 r_3 = \Sigma ir = o \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

was natürlich nur dann möglich ist, wenn entweder alle i = Null, oder dieselben verschiedenen Vorzeichens sind. Die Ströme werden positiv

Fig. 386.



gerechnet, wenn die positive Elektricität in Richtung des Uhrzeigers den Kreis durchströmt. In einem Stromkreise, in den Seitenströme aus- und einmünden, wird also keine gemeinsame Stromlänge längs des ganzen Kreises herrschen, das Ohm'sche Gesetz wird daher nicht in der einfachen Form $IR = E$ zur Anwendung kommen, wohl aber lässt sich dasselbe in dem obigen Falle, wo die treibenden elektromotorischen Kräfte sich ausserhalb des betrachteten Kreises befinden, durch das erweiterte Gesetz ersetzen:

In einem geschlossenen Stromkreise, der keine elektromotorische Kraft enthält, ist die algebraische Summe der Producte aus den Stromstärken der einzelnen Strecken mit deren Widerständen gleich Null.

Jetzt gehen wir auf den Fall über, dass der Stromkreis auch elektromotorische Kräfte enthalte. Fig. 386 I und II stellt dies in der

früheren Weise im Grundriss und im Profile (Potentialdiagramm) dar. Der Stromkreis entspricht dem früheren, nur sind bei ε und ε' elektromotorische Kräfte von der Grösse e und e' eingeschaltet. Das Zeichen der Ströme werde wiederum als positiv angenommen, wenn die positive Elektricität im Strome in Richtung des Uhrzeigers getrieben wird. Die elektromotorische Kraft wird als positiv angesehen, wenn sie das Potential auf jener Polklemme hebt, welche im Kreise nach rechts folgt. Es ist daher hier, wie aus II ersichtlich, e positiv, e' negativ. Geht man nun wiederum von A über B, C, D nach A, so müssen wiederum alle Abfälle und Anstiege einander compensiren, was zu der Gleichung führt:

$$ir + i_1 r_1 + i_2 r_2 + i_3 r_3 - e - e' = o,$$

was wir abgekürzt schreiben:

$$\Sigma ir = \Sigma e \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 2)$$

Der Sachverhalt ist also folgender:

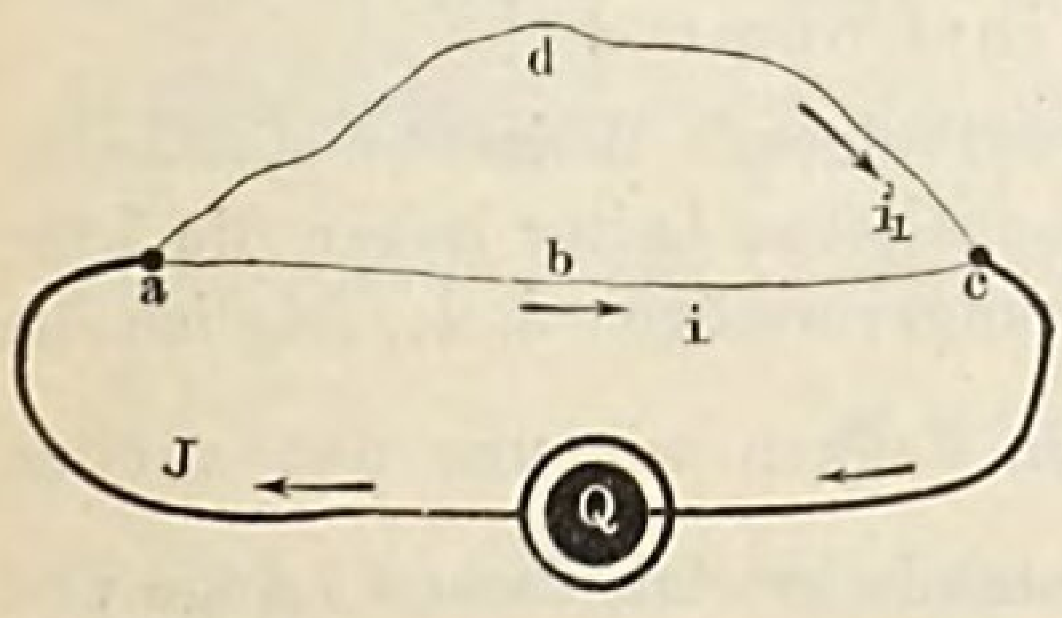
Wenn man in irgend einem Stromnetze einen in sich geschlossenen Kreis ins Auge fasst, so stellt sich derselbe als eine Reihe von durch Knotenpunkte getrennten Leiterstücken dar, innerhalb welcher letzterer die Stromstärke constant ist, während sie von einem Leiterstück zum anderen, d. h. bei jedem Knotenpunkte wechselt. Enthalten diese Leiterstücke elektromotorische Kräfte, so ändert dies wohl die Grösse der Stromstärken, aber nicht deren Constanz innerhalb der Leiterstücke. Die Summe der Producte der Stromstärken der einzelnen Leiterstücke mit ihren Widerständen ist dabei stets gleich der algebraischen Summe der im Kreise vorhandenen elektromotorischen Kräfte.

Dies ist die allgemeinste Form des Ohm'schen Gesetzes, mit welcher man alle einschlägigen Aufgaben zu lösen vermag.

Anwendungen der Kirchhoff'schen Sätze. Wir wollen nun die im vorigen Paragraphen abgeleiteten Kirchhoff'schen Sätze auf einige wichtigere Fälle anwenden, die uns in der Folge als nützlich erscheinen werden. 137

Erster Fall. Einfache Verzweigung. Es sei Q, Fig. 387, die Stromquelle, welche einen Strom von der Stärke J liefert, der bis zum Punkte a ungetheilt fortströmt. In a aber findet eine Stromtheilung statt. Ein Stromtheil von der Stärke i geht durch den Zweig abc, ein anderer Theil des Stromes von der Stärke i_1 geht von a über d nach c.

Fig. 387.



Zunächst haben wir nach dem ersten Kirchhoff'schen Satze:

$$J = i + i_1$$

oder

$$J - i - i_1 = o \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

Die Summe der Stromstärken in den beiden Zweigen ist also gleich der Stärke des ungetheilten Stromes.

Nach dem zweiten Satze von Kirchhoff haben wir, wenn wir mit R, r, r_1 die Widerstände der Leitungsstücke $a\,Q\,c$, $a\,b\,c$, $a\,d\,c$ bezeichnen, im Kreise $a\,b\,c\,d$, in welchem keine elektromotorische Kraft vorkommt:

$$i\,r - i_1\,r_1 = o \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

im Kreise $Q\,a\,b\,c\,Q$, in welchem die elektromotorische Kraft der Stromquelle Q, welche wir mit E bezeichnen, vorkommt:

$$J\,R + i\,r = E \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

ebenso im Kreise $Q\,a\,d\,c\,Q$:

$$J\,R + i_1\,r_1 = E \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

Aus 1), 3) und 4) folgt

$$J = \frac{E\,(r + r_1)}{r\,r_1 + R\,r + R\,r_1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

$$i = \frac{E\,r_1}{r\,r_1 + R\,r + R\,r_1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6)$$

$$i_1 = \frac{E\,r}{r\,r_1 + R\,r + R\,r_1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 7)$$

Bezeichnen wir nun noch mit W den Gesammtwiderstand, welchem der von Q ausgehende Strom begegnet, so folgt für denselben aus 5):

$$W = \frac{E}{J} = \frac{r\,r_1 + R\,r + R\,r_1}{r + r_1} = R + \frac{r\,r_1}{r + r_1}$$

Somit ist der Widerstand der beiden verzweigten Leiter von a bis c zusammen

$$w = W - R = \frac{r\,r_1}{r + r_1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 8)$$

Dieses Resultat hat praktische Bedeutung, da es oft vorkommt, dass ein Widerstand R durch zwei neben einander geschaltete Leiter verschiedenen Widerstandes r und r_1 gebildet wird. Man kann die darauf bezügliche Regel so aussprechen: Zwei neben einander geschaltete Widerstände haben einen Gesammtwiderstand, welcher gleich ist ihrem Product, dividirt durch ihre Summe.

Dieselbe Regel hätten wir einfacher auf folgende Weise direct ableiten können. Die beiden neben einander geschalteten Leiter haben die Längen l, l_1, die Querschnitte q, q_1, die Leitungsvermögen λ, λ_1, folglich die Widerstände $r = \frac{l}{q\,\lambda}$, $r_1 = \frac{l_1}{q_1\,\lambda_1}$. Nun denken wir uns den zweiten Leiter durch einen von gleichem Widerstande ersetzt, dessen Länge und Leitungsvermögen mit jenem des ersten Leiters übereinst mmt, so dass

also nur der Querschnitt verschieden bleibt. Dieser Querschnitt q' ergiebt sich aus der Bedingung:

$$\frac{l_1}{q_1 \lambda_1} = \frac{l}{q' \lambda}, \quad \text{also } q' = q_1 \frac{l \lambda_1}{l_1 \lambda}.$$

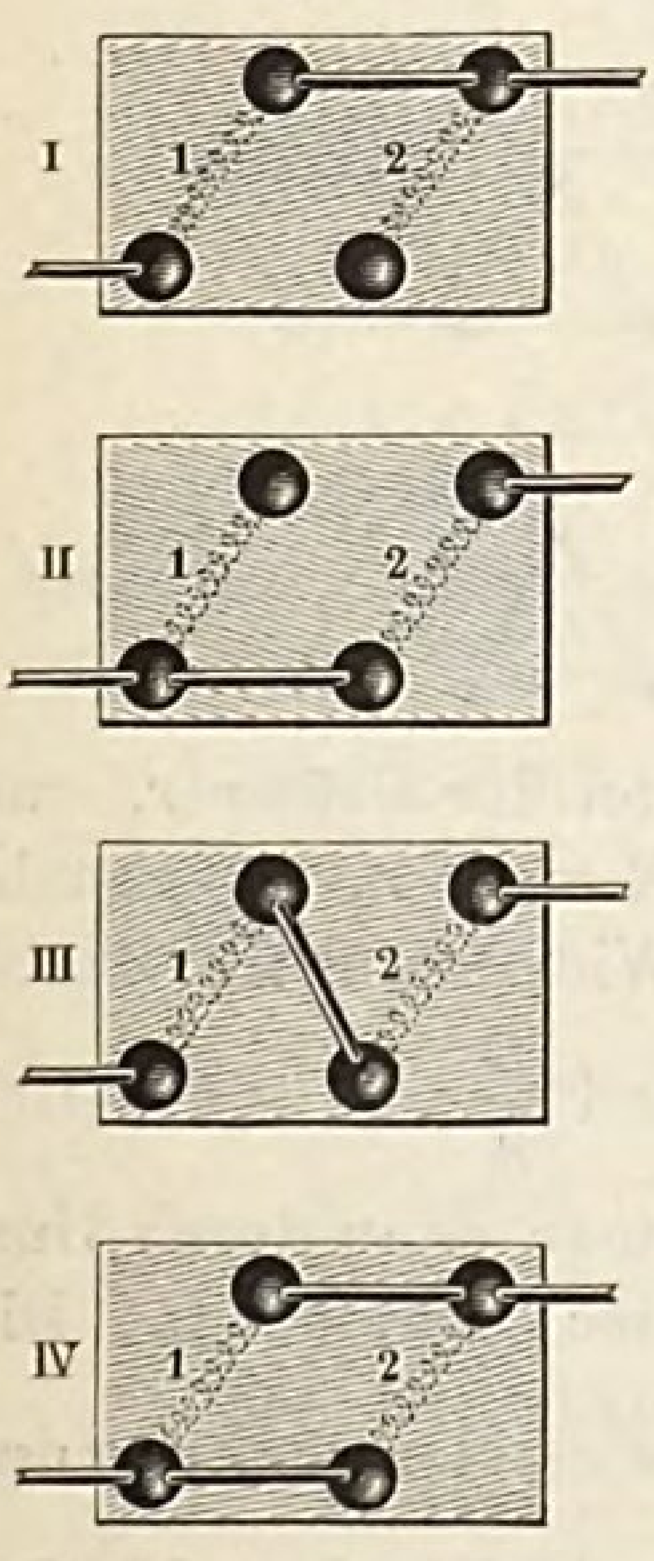
Zwei Leiter von gleicher Länge und gleichem specifischen Leitungsvermögen wirken aber wie ein solcher mit der Summe der Querschnitte. Mithin ist der Gesammtwiderstand:

$$w = \frac{l}{(q + q')\lambda} = \frac{l}{q\lambda + q_1 \lambda_1 \frac{l}{l_1}} = \frac{\frac{l}{q\lambda} \cdot \frac{l_1}{q_1 \lambda_1}}{\frac{l}{q\lambda} + \frac{l_1}{q_1 \lambda_1}} = \frac{r r_1}{r + r_1}.$$

Aus 2) folgt $i : i_1 = r_1 : r$ oder $i : i_1 = \frac{1}{r} : \frac{1}{r_1}$, d. h. die Stromstärken der Zweige verhalten sich verkehrt, wie die Widerstände derselben, ein Satz, der auch bei beliebiger Anzahl von Zweigen gilt.

Führt man eine analoge Rechnung für eine Verzweigung in drei Zweige durch, deren Widerstände r_1, r_2, r_3 sind, so erhält man für den Widerstand der Zweige zusammen den Ausdruck:

Fig. 388.



$$w = \frac{r_1 r_2 r_3}{r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1} \quad \ldots\ldots \quad 9)$$

Die Beziehungen 8) und 9) können benutzt werden, um durch verschiedene Combination von wenigen gegebenen Widerständen eine grössere Anzahl solcher von verschiedener Grösse zu bilden.

Auf einem Brettchen, Fig. 388, welches den Deckel eines Kästchens bildet, seien vier Quecksilbernäpfe in der aus der Figur ersichtlichen Weise angeordnet. Je zwei derselben seien unterhalb durch die Widerstände $r_1 = 1$ und $r_2 = 2$ verbunden. Durch Einsenken von einem oder zwei kupfernen Verbindungsbügeln, deren Widerstand verschwindend klein angenommen werden kann, sind dann die vier in der Figur angedeuteten Combinationen herzustellen, denen die Widerstände 1, 2, 3 und $\frac{2}{3}$ entsprechen. Der Widerstand im Falle IV ist nämlich nach 8):

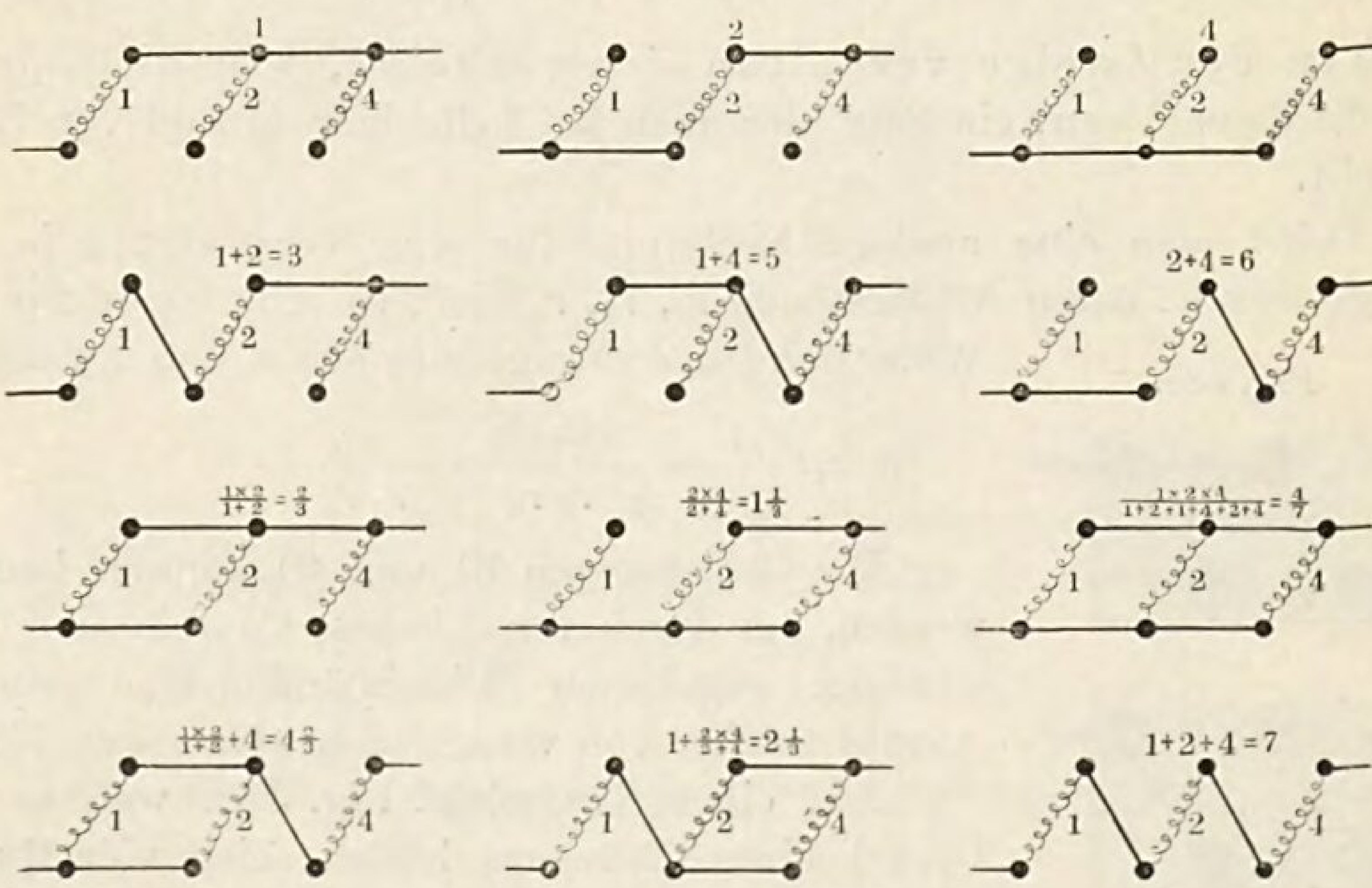
$$w = \frac{1 \times 2}{1 + 2} = \frac{2}{3}.$$

Die Anzahl der möglichen Combinationen steigt sehr mit der Vermehrung der vorhandenen Einzelwiderstände. So zeigt z. B. Fig. 389

worin die Verbindungen von drei Widerständen von 1, 2, 4 Einheiten schematisch dargestellt sind, dass ausser den ganzzahligen Widerständen 1 bis 7 noch die fünf dazwischen liegenden Widerstände $^4/_7$, $^2/_3$, $1^1/_3$, $2^1/_3$ und $4^2/_3$ herstellbar sind, denen sich mit Hülfe übergreifender Bügel noch einige hinzufügen liessen. Aus zehn in dieser Weise zu verbindenden Widerständen, deren jeder einzelne den Werth 10 besitzt, lassen sich durch verschiedene Combination 94 verschiedene Widerstände von 1 bis 100 herstellen.

Dieses Princip hat F. Kohlrausch*) zur Construction eines leicht controlirbaren Verzweigungsrheostaten benutzt. Es liegt nämlich bei galvanometrischen Arbeiten oft das Bedürfniss vor, einen Strom in zwei sehr verschieden grosse Zweigströme von genau bekanntem Verhält-

Fig. 389.



niss zu theilen. Hat man n gleiche Widerstände von der Grösse r, und n gleiche Widerstände von der Grösse R, und ist $R = n^2 r$, so entsteht durch Hintereinanderschaltung der ersteren ein Widerstand nr, durch Nebeneinanderschaltung der letzteren ein Widerstand $\frac{R}{n} = n\,r$. Hat man sich von dieser Gleichheit überzeugt, so kann man dann durch Umschalten sehr mannigfache Widerstandsverhältnisse herstellen. Die Nebeneinanderschaltung der r giebt $\frac{r}{n}$, die Hintereinanderschaltung der R giebt nR, das Verhältniss beider ist n^4. Für $n = 10$ ist $n^4 = 10000$. Es lassen sich also mit zwei Reihen von je 10 Widerständen Verhältnisse von 1 : 1 bis 1 : 10000 in zu jeder Zeit sofort controlirbarer Weise her-

*) Sitzungsber. der math.-phys. Classe der k. bayer. Akademie d. W. 1887, S. 11.

stellen. F. Kohlrausch ordnete nun 3 Reihen von je 10 Widerständen zu je 1, 100 und 10000 Ohm in einem Kasten mit Deckel aus Hartgummi, in welchen stählerne Quecksilbernäpfe eingelassen waren, in welche die Enden der Widerstände von unten einmündeten. Amalgamirte Kupferbügel von 5 cm Länge und $5^1/_2$ mm Dicke (0,00005 Ohm Widerstand) dienten zur Verbindung. Fig. 390 zeigt die Anordnung des Ganzen. Die Spiralen deuten die Widerstände an, die Bügel sind weggelassen. Die hinter einander geschalteten Einer, sowie die neben einander geschalteten Hunderter geben je 10 Ohm, die hinter einander geschalteten Hunderter, sowie die neben einander geschalteten Zehntausender geben je 1000 Ohm. Die drei Reihen lassen sich also leicht vergleichen. Schaltet man dann die Einer neben einander, so geben sie $^1/_{10}$ Ohm, die hinter einander geschalteten Zehntausender geben 100000 Ohm, das Verhältniss ist dann wie 1 : 1 Million. Näheres über die Vortheile und den Gebrauch dieses Rheostaten suche man in der citirten Abhandlung.

Fig. 390.

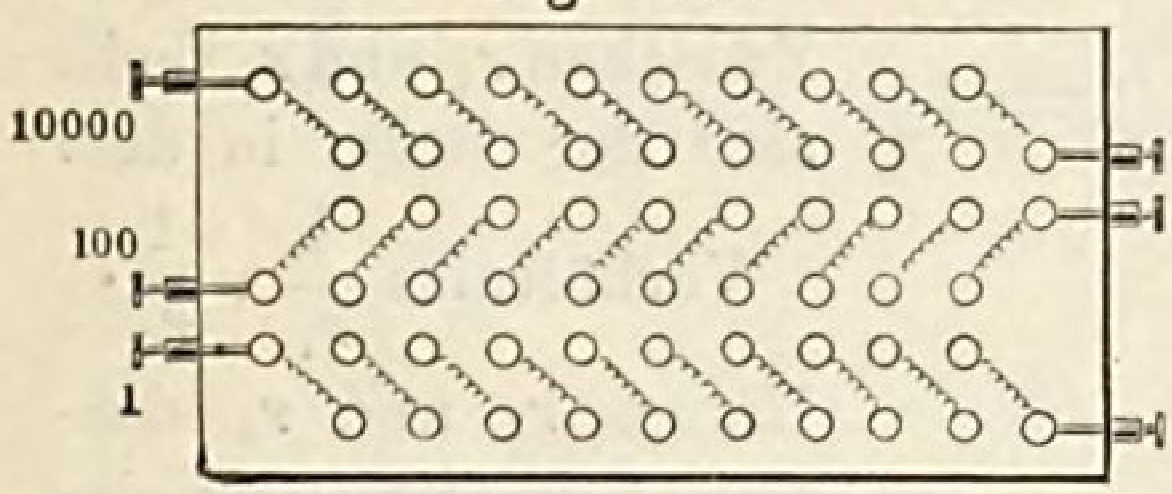
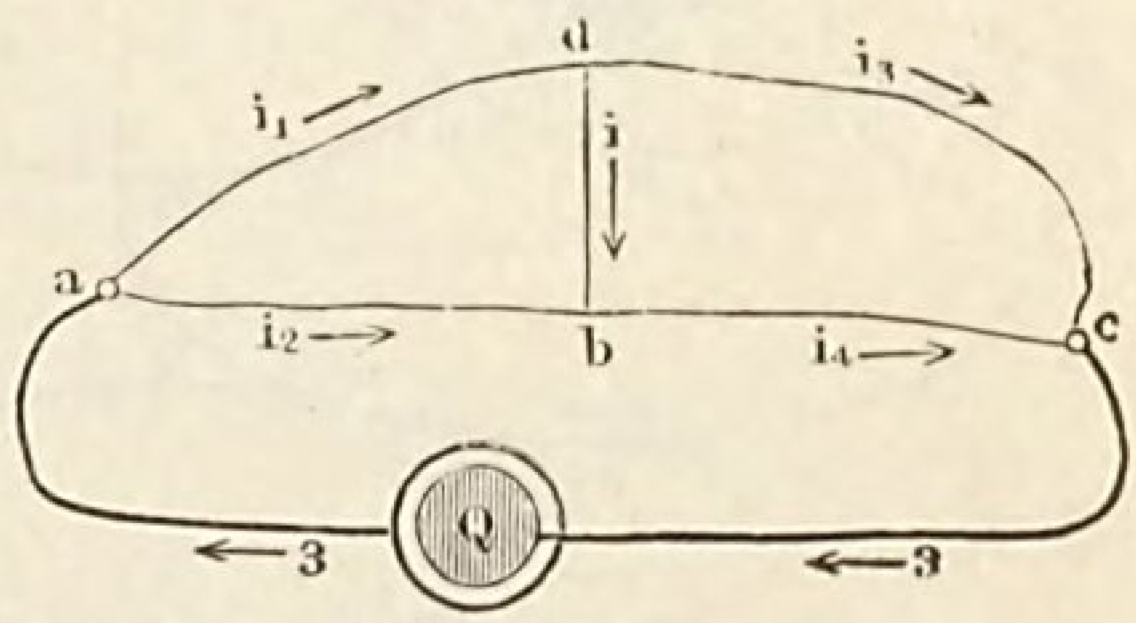


Fig. 391.



Zweiter Fall. Verzweigung mit Brücke.

Wir bringen in der Verzweigung des vorigen Falles eine Querverbindung (Brücke) db an (Fig. 391). Bezeichnen wir nun die Stromstärken und Widerstände in den einzelnen Leitungsstücken wie folgt:

Leitungsstück:	aQc	ad	ab	dc	bc	db
Stromstärke:	J	i_1	i_2	i_3	i_4	i
Widerstand:	R	r_1	r_2	r_3	r_4	r.

Nach Kirchhoff's erstem Satze ergiebt sich für die Knotenpunkte:

in a und c $\quad J = i_1 + i_2 = i_3 + i_4$

in d und b $\quad i = i_1 - i_3 = i_4 - i_2$.

Nach Kirchhoff's zweitem Satze für die Kreise

$adb \quad ir + i_1 r_1 - i_2 r_2 = o$

$dcb \quad ir + i_4 r_4 - i_3 r_3 = o$

$QadcQ \quad JR + i_1 r_1 + i_3 r_3 = E$

$QabcQ \quad JR + i_2 r_2 + i_4 r_4 = E$

Zur Berechnung der sechs Stromstärken haben wir hier acht Gleichungen, von denen zwei überzählig sind. Nach Ausführung der sämmtlichen Eliminationen, welche keine Schwierigkeiten bieten, erhält

man für die Stromstärke i in der Brücke, welche uns hier vornehmlich interessirt, den Ausdruck $i =$

$$\frac{E\,(r_2 r_3 - r_1 r_4)}{R r(r_1 + r_2 + r_3 + r_4) + R(r_1 + r_2)(r_3 + r_4) + r(r_1 + r_3)(r_2 + r_4) + r_1 r_3 (r_2 + r_4) + r_2 r_4 (r_1 + r_3)}$$

Offenbar wird also $i = o$, d. h. durch die Brücke geht kein Strom, wenn $r_2 r_3 = r_1 r_4$, oder wenn sich verhält:

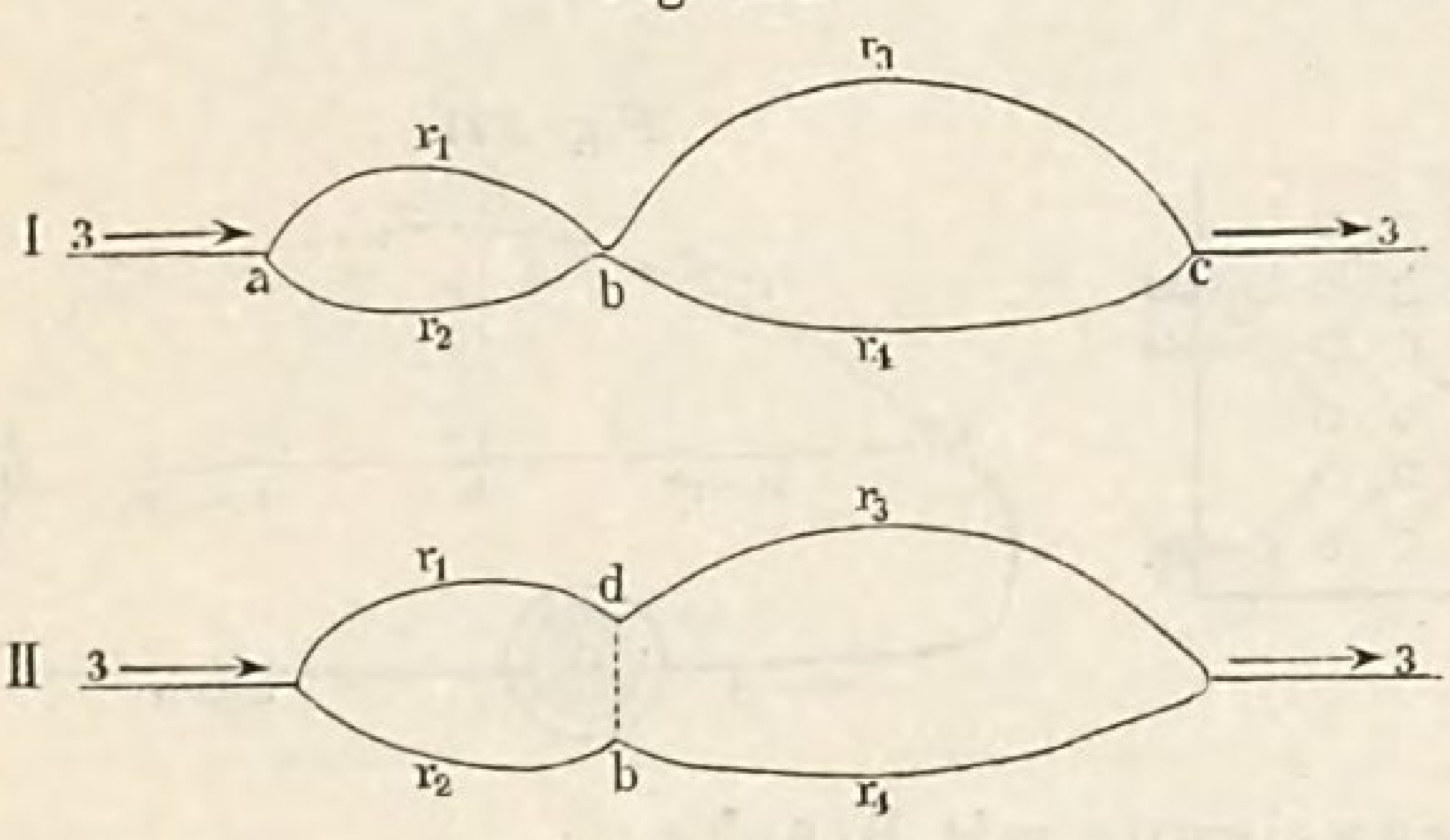
$$r_1 : r_2 = r_3 : r_4.$$

Dieser Satz findet bei der später zu beschreibenden Wheatstone'schen Brückenvorrichtung eine wichtige Anwendung.

Einfacher gelangen wir zu demselben Resultate durch folgende Betrachtung:

Ein Strom theile sich bei a, Fig. 392 I, durchfliesse die Leiter r_1 und r_2 vereinige sich wieder bei b und theile sich neuerdings zwischen den Leitern r_3 und r_4, um sich bei c neuerdings zu vereinigen. Zwischen r_1 und r_2 theilt sich der Strom in dem Verhältniss $\frac{1}{r_1} : \frac{1}{r_2}$. Haben r_3 und r_4 dasselbe Verhältniss zu einander wie r_1 und r_2, so theilt sich der Strom bei b neuerdings in demselben Verhältniss wie bei a. Daraus folgt, dass bei b weder Elektricität vom Zweige r_1 in den Zweig r_4, noch Elektricität des Zweiges r_2 in den Zweig r_3 überzutreten braucht. Wir können daher den Verlauf so ansehen, als ob der Strom in r_1 direct in den Zweig r_3, jener von r_2 direct in den Zweig r_4 übertreten würde. Wir könnten also bei b horizontal durchschneiden, ohne dass dadurch an den Stromtheilen etwas geändert würde. Ob wir dann die so getrennten oberen und unteren Zweige, wie in Fig. 392 II, durch ein Stück $b\,d$ verbinden oder nicht, muss ganz ohne Einfluss sein, da ja ohnedies keine Elektricität denselben durchströmen wird. Anders steht die Sache, wenn z. B. der Widerstand r_3 im Verhältniss zu r_4 grösser wäre, als dem Verhältniss $r_1 : r_2$ entspricht. Es müsste dann bei b, Fig. 392 I, eine Quantität Elektricität von r_1 nach r_4 über die Kreuzungsstelle hinweggehen, also in Fig. 392 II ein Strom von d nach b gehen.

Fig. 392.



Auch durch Betrachtung der Potentialdiagramme kann man diesen Sachverhalt klarlegen. In Fig. 393 stelle die Abscisse adc die Leitung von a über d nach c der Fig. 391 vor, ebenso die Abscisse $a'b\,c'$ (Fig. 393) die Leitung von a über b nach c (Fig. 391), und zwar sollen die Längen der Abscissen die Grössen der Widerstände r_1, r_3, r_2. r_4

darstellen. Drücken wir nun die Potentialdifferenz zwischen den Punkten a und c durch die Ordinate $aP = a'P'$ aus, indem wir das Potential bei $c = 0$ setzen, so stellt die schiefe Linie Pc den Verlauf der Potentialwerthe längs adc, die schiefe Linie $P'c'$ dasselbe längs abc vor.

Soll nun in der Brücke db kein Strom gehen, so müssen die Potentialwerthe in d und b gleich gross, also die Ordinate dp = der Ordinate bp' sein. Dies ist aber offenbar nur dann der Fall, wenn

$$ad : a'b = dc : bc'$$

oder

$$r_1 : r_2 = r_3 : r_4.$$

Fig. 393.

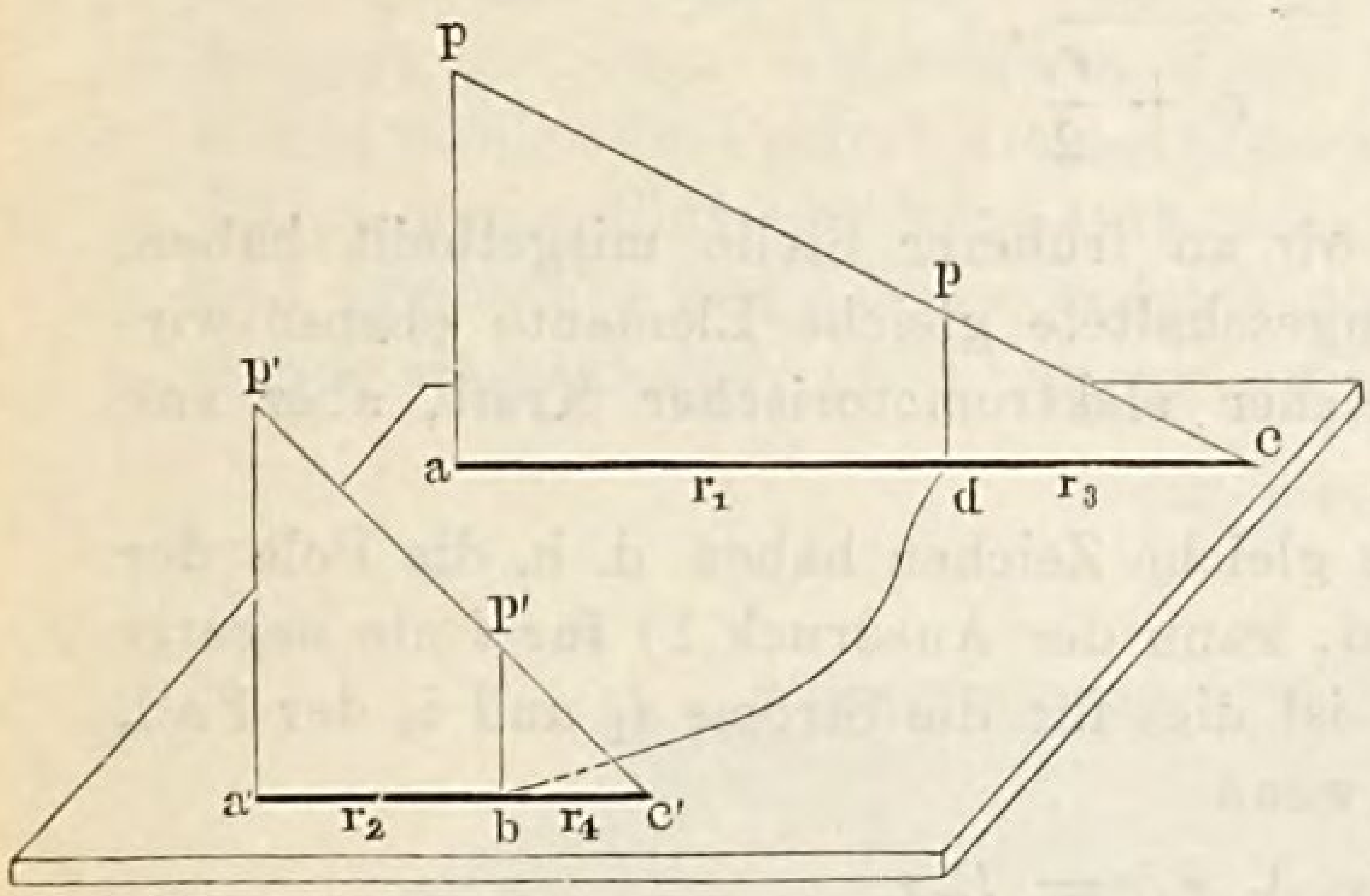
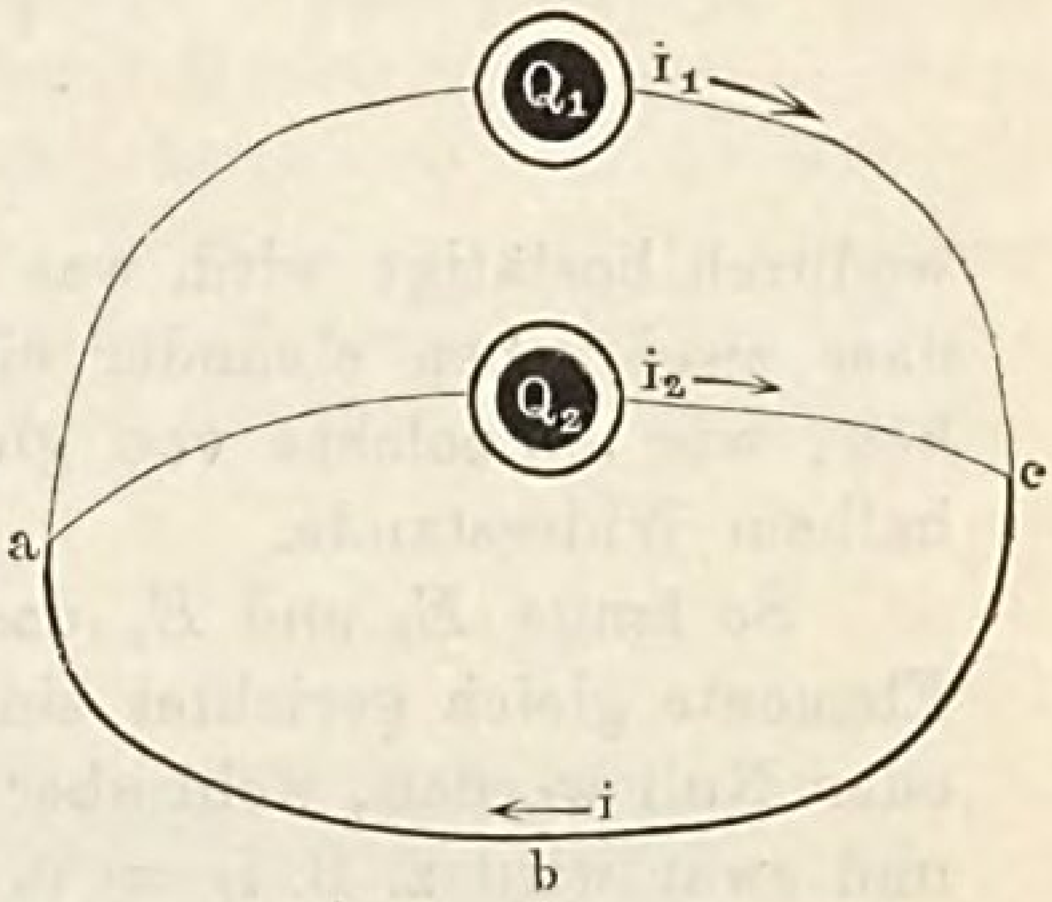


Fig. 394.



Dritter Fall. Verzweigung mit elektromotorischen Kräften in den Zweigen.

Es seien zwei Stromquellen Q_1 und Q_2 mit den elektromotorischen Kräften E_1 und E_2 in der Weise mit Leitern verbunden, wie dies Fig. 394 andeutet. Die beiden positiven Pole seien mit c in Verbindung, also gleichgerichtet.

Wir haben also:

im Leiter	abc	aQ_1c	aQ_2c
die Stromstärken	i	i_1	i_2
die Widerstände	r	r_1	r_2
die elektromotorischen Kräfte	0	E_1	E_2.

Bei den Widerständen r_1 und r_2 sind die Widerstände der Ketten mitgerechnet.

Nach den Sätzen von Kirchhoff gelten dann die Gleichungen:

$$i - i_1 - i_2 = 0$$
$$ir + i_1 r_1 = E_1$$
$$ir + i_2 r_2 = E_2$$
$$i_1 r_1 - i_2 r_2 = E_1 - E_2.$$

Die letzte dieser Gleichungen ist schon in den vorhergehenden enthalten.

Bei der Auflösung erhält man für die Stromstärken die Werthe

$$i = \frac{E_2 r_1 + E_1 r_2}{r r_1 + r_1 r_2 + r_2 r} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

$$i_1 = \frac{E_1 (r + r_2) - E_2 r}{r r_1 + r_1 r_2 + r_2 r} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

$$i_2 = \frac{E_2 (r + r_1) - E_1 r}{r r_1 + r_1 r_2 + r_2 r} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

Nimmt man an, dass die Elemente Q_1 nnd Q_2 gleiche elektromotorische Kraft haben, also $E_1 = E_2 = E$, sowie, dass die Widerstände r_1 und r_2 gleich seien, so reducirt sich der Ausdruck für i auf die Form

$$i = \frac{E}{r + \frac{r_1}{2}},$$

wodurch bestätigt wird, was wir an früherer Stelle mitgetheilt haben, dass zwei neben einander eingeschaltete gleiche Elemente ebenso wirken, wie ein solches von gleicher elektromotorischer Kraft, aber von halbem Widerstande.

So lange E_1 und E_2 das gleiche Zeichen haben, d. h. die Pole der Elemente gleich gerichtet sind, kann der Ausdruck 1) für i nie negativ oder Null werden, wohl aber ist dies für die Ströme i_1 und i_2 der Fall, und zwar wird z. B. $i_1 = 0$, wenn

$$E_1 (r + r_2) = E_2 r,$$

also wenn

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{r}{r + r_2}.$$

Kehrt man eines der Elemente, z. B. Q_2, um, so dass also der negative Pol mit c in Verbindung kommt, so wird E_2 negativ und

$$i = \frac{E_1 r_2 - E_2 r_1}{r r_1 + r_1 r_2 + r_2 r}$$

In diesem Falle kann also i, d. i. die Stromstärke, in dem Zweige abc = Null werden, wenn nämlich

$$E_1 r_2 = E_2 r_1$$

oder

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{r_1}{r_2}.$$

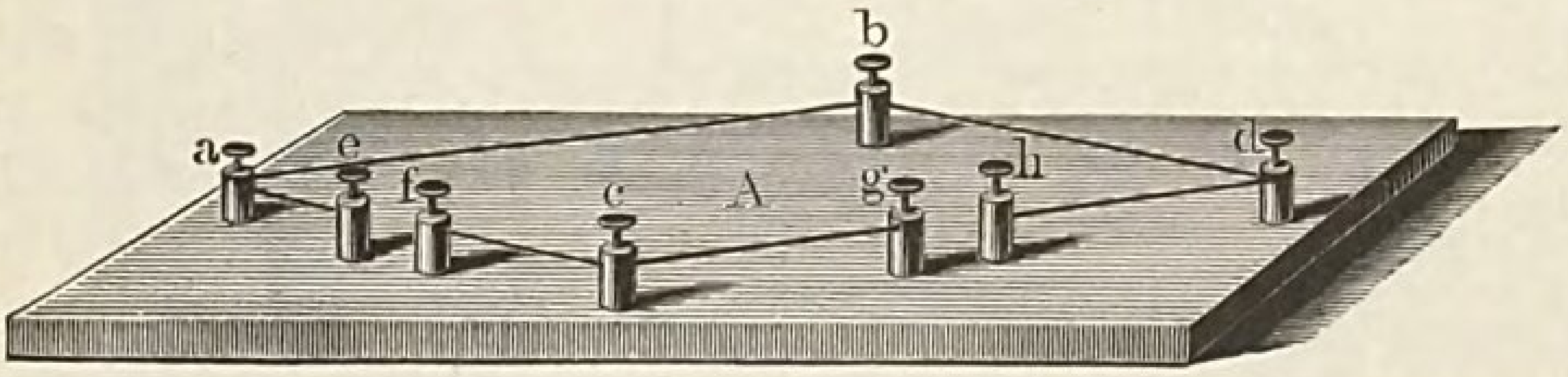
Von diesen Sätzen hat Poggendorff eine wichtige, später zu erwähnende Anwendung gemacht.

138 **Die Brückenvorrichtungen von Wheatstone, Kirchhoff, W. Thomson, A. Matthiesen und Hockin.** S. 416 haben wir ein Verfahren flüchtig angedeutet, um einen unbekannten

Widerstand zu messen, welches darauf beruht, dass zwei Widerstände einander gleich sind, wenn sie, einzeln in denselben Stromkreis eingeschaltet, dieselbe Stromstärke geben. Diese Methode der unmittelbaren Substitution ist die einfachste, aber nicht immer genau genug.

Auf dem im zweiten Falle des vorigen Paragraphen abgeleiteten Satze über die Stromverzweigung beruht ein von Wheatstone ersonnenes, vorzüglich genaues Verfahren zur Vergleichung zweier Widerstände. Wheatstone's Apparat hatte ursprünglich die in Fig. 395 abgebildete Form. Auf einem etwa 40 cm langen und 25 cm breiten Brette sind, einen Rhombus bildend, die Messingsäulchen *a*, *b*, *c*, *d* befestigt, ferner noch zwischen *a* und *c* die Messingsäulchen *e* und *f*, sowie zwischen *c* und *d* die Säulchen *g* und *h*. Diese Säulchen sind in der aus der Figur ersichtlichen Weise durch Drähte verbunden. Bei *a* und *d* werden die Poldrähte eines Elementes, bei *c* und *b* die Zuleitungsdrähte eines Galvanometers verbunden. Zwischen *e* und *f* einerseits und zwischen *g* und *h* andererseits werden die zu vergleichenden Widerstände eingeschaltet. Die Leitung *bc* bildet die Brücke; in derselben

Fig. 395.



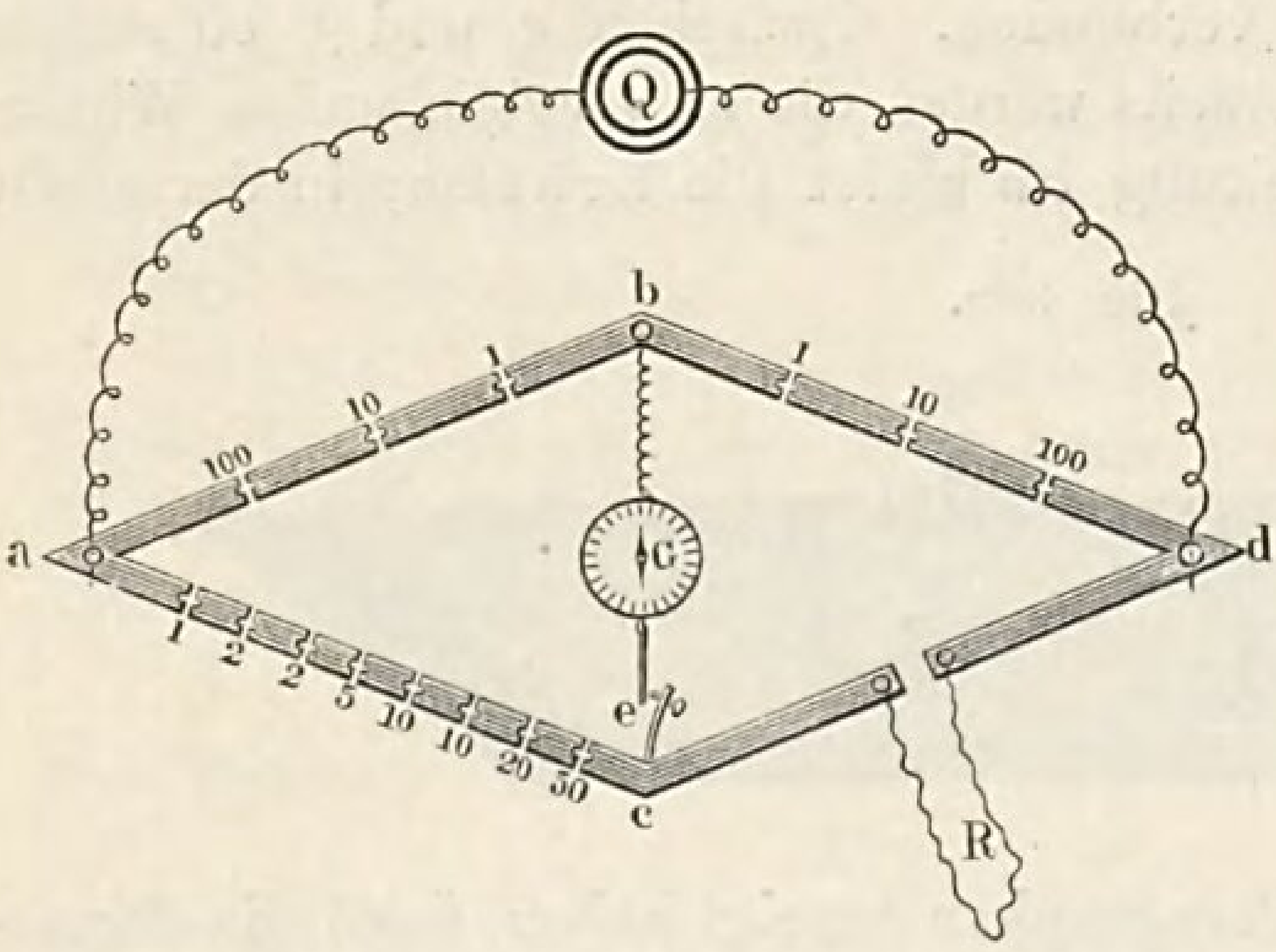
herrscht, wie wir im vorigen Paragraphen gezeigt haben, dann die Stromstärke gleich Null, wenn die Widerstände in *ab* und *bd* sich zu einander verhalten wie jene in *aefc* und *cghd*. Sind also die Widerstände der Drahtvorrichtungen links und rechts einander gleich, so herrscht in *bc* die Stromstärke Null, wenn auch die beiden bei *ef* und *gh* eingeschalteten Leiter gleichen Widerstand haben. Ist zwischen *b* und *c* ein sehr empfindliches Galvanometer eingeschaltet, so hat der geringste Unterschied im Widerstande der beiden Leiter zur Folge, dass die Galvanometernadel ausschlägt.

Um mit dieser Vorrichtung den Widerstand eines Drahtes, in Windungen des Rheostaten ausgedrückt, zu erhalten, wird zwischen *e* und *f* der Rheostat mit einigen Windungen, zwischen *g* und *h* aber ein Drahtstück eingeschaltet, dessen Widerstand nahezu dem des auf der anderen Seite eingeschalteten Theiles des Rheostaten gleich ist und dann Alles so regulirt, dass die Nadel auf 0 zu stehen kommt. Wird nun zwischen *g* und *h* ausser dem hier schon vorhandenen Drahtstück noch der Draht *A* eingeschaltet, dessen Widerstand man ermitteln will, so hat man auf der anderen Seite noch eine Reihe von *n* Rheostatenwindungen einzuschalten, um die Nadel wieder auf 0 zurückzubringen. Diese Zahl *n* der

noch einzuschaltenden Umgänge des Rheostatendrahtes ist das Maass für den Leitungswiderstand des Drahtes *A*.

Statt immer erst von Fall zu Fall einen Rheostat in die Wheatstone'sche Brücke einzuschalten, ist es viel bequemer, ein- für allemal Rheostat und Brücke in einem Apparate zu vereinigen. Derselbe erhält dann die in Fig. 396 schematisch gezeichnete Anordnung. Die Zweige *ab* und *bd* enthalten die nach Siemens' Stöpselrheostat eingerichteten Widerstandspaare zu 1, 10 und 100 Ohm. Der Zweig *ac* einen Stöpselrheostat, dessen einzelne Widerstände sich durch Ziehen der betreffenden Stöpsel addiren lassen. Der zu messende Widerstand *R* ist im Zweige *cd* einzuschalten. *G* stellt das Galvanometer vor. Die Brücke *bc* ist bei *e* für gewöhnlich unterbrochen und wird nur momentan durch einen Taster geschlossen, um sich von dem Vorhandensein oder der Abwesenheit eines Stromes in der Brücke zu überzeugen. Auch der Hauptstrom im unverzweigten Leiter wird immer nur kurz vorher geschlossen, um nicht die durchströmten Leiter zu erwärmen und dadurch in ihrem Widerstande zu verändern. Je nachdem der zu messende Widerstand *R* näher an 1 oder 10 oder 100 Ohm ist, werden in den Zweigen *ab* und *bd* die Widerstandspaare 1, 10 oder 100 Ohm durch Ziehen ihrer Stöpsel eingeschaltet, weil es vortheilhaft ist, wenn die Widerstände in den oberen Zweigen nicht allzu sehr von denen der unteren Zweige abweichen.

Fig. 396.



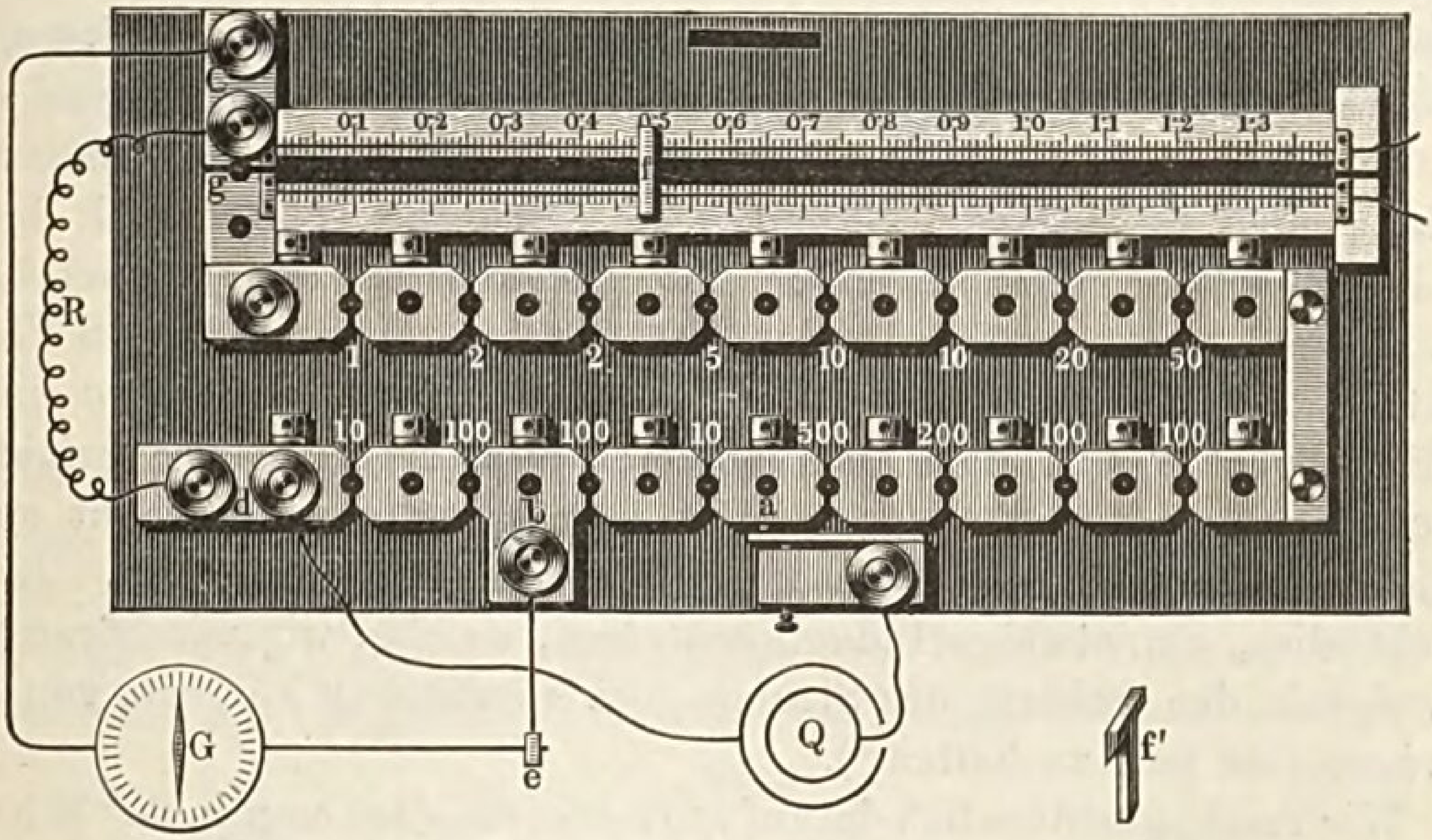
Durch probeweises Einschalten der Widerstände im Zweige *ac* lassen sich diejenigen beiden um eine Einheit abweichenden Widerstände ermitteln, zwischen denen der Widerstand *R* liegen muss, was man daran erkennt, dass der nächst kleinere Widerstand den entgegengesetzten Galvanometerausschlag hervorruft, wie der nächst grössere. Man kann auch nach diesen Ausschlägen die Bruchtheile durch Interpolation annähernd ermitteln, wie bei den Ausschlägen an einer Wage.

Man habe beispielsweise ein Stück Draht als zu messenden Widerstand *R* eingespannt, dessen Grössc man zwischen 10 und 100 Ohm schätzt. Man zieht oben die beiden mit 100 bezeichneten Stöpsel. Hierauf schliesst man den Strom im Hauptzweige und zieht probeweise zwischen *a* und *c* den Stöpsel 50. Beim Niederdrücken des Tasters schlage die Nadel nach rechts aus. Man zieht auch noch den Stöpsel 20, die Nadel schlage nach links aus. Man stöpselt 20 wieder und zieht

statt dessen den Stöpsel 10; die Nadel schlage 4 Grade nach rechts aus. Man zieht noch den Stöpsel 1, die Nadel schlage 1 Grad nach links aus. Somit ist der Widerstand R zwischen $50 + 10 = 60$ und $50 + 10 + 1 = 61$ jedoch viermal näher an 61 als an 60, mithin $= 60{,}8$ Ohm.

Um Widerstände zu messen, die 10 mal oder 100 mal so gross oder so klein sind, als die im Zweige ac verfügbaren, kann man, wenn auch mit etwas geringerer Genauigkeit, so verfahren, dass man in den oberen Zweigen die Widerstände 1 und 10, 1 und 100, beziehungsweise 10 und 1, 100 und 1, einschaltet, und dann, nachdem man wie oben verfahren, mit 10 oder 100 multiplicirt oder dividirt, was nach dem früher Mitgetheilten keiner weiteren Erklärung bedarf. Soll die Messung auf kleinere Bruchtheile eines Ohms ausgeführt werden, so muss der Zweig ac noch Zehntel resp. Hundertel von Ohm enthalten oder

Fig. 397.



mit einem Walzenrheostaten oder einem Poggendorff'schen Rheokord ausgerüstet sein, welches beliebig kleine Bruchtheile herzustellen gestattet.

Die Fig. 396 ist, wie erwähnt, nur eine schematische. Bei den im Gebrauch befindlichen Apparaten sind die einzelnen Theile in compendiösere Form gebracht und insbesondere wird das Galvanometer seitwärts auf abgesonderter Unterlage aufgestellt, wo es vor Erschütterungen sicherer ist.

Fig. 397 zeigt einen solchen Brückenrheostat von G. Lorenz in Chemnitz in der Ansicht von oben sammt den schematisch hinzugezeichneten Verbindungen mit Galvanometer und Stromquelle. Da in dieser Figur die Buchstaben dieselbe Bedeutung haben wie in Fig. 396, so ist es ganz leicht, sich zurechtzufinden. Von der Stromquelle a führen zunächst die beiden Poldrähte zu den Punkten a und d, wo die Verzweigung eintritt. Bei a ist überdies eine Tastervorrichtung angebracht,

vermittelst welcher man den Strom, der sonst unterbrochen ist, einen Moment vor dem Versuch schliessen kann. Von den Punkten *a* und *d* führen die Zweige *ab* und *db* zu dem Punkte *b*, welcher den einen Endpunkt der „Brücke" bildet. Diese Zweige enthalten die Widerstandspaare 10 und 100, 100 und 10, welche durch Ziehen der Stöpsel eingeschaltet werden können (die Bohrungen innerhalb der Messingbacken gehören zum Einstecken der nicht benöthigten Stöpsel; letztere sind in der Figur weggelassen). Von den Punkten *a* und *d* führen die beiden anderen Zweige zu *c*, dem anderen Ende des Brückendrahtes. Dabei enthält der Zweig *dc* den zu messenden Widerstand *R*, der Zweig *ac* die sämmtlichen übrigen Widerstände des Rheostaten von 500 Ohm herab bis 1 Ohm und ausserdem noch ein Rheokord zur Herstellung der Bruchtheile unter 1 Ohm.

Dieses Rheokord besteht aus zwei parallel ausgespannten feinen Platindrähten, die von einander isolirt sind und durch das Verbindungsstück *f* an beliebiger Stelle quer verbunden werden können. *f'* zeigt dieses Verbindungsstück; es ist ein prismatischer Metallkörper mit mässig scharfer Kante und einer prismatischen Verlängerung, welche in den Schlitz des Kastendeckels hineinragt. So lange die Lücke bei *g* gestöpselt bleibt, ist das Rheokord ganz ausgeschaltet, sobald man den Stöpsel bei *g* gezogen hat, muss der Zweigstrom den Umweg über die beiden Platindrähte und das Verbindungsstück *f* machen. Zwischen *b* und *c* endlich ist die „Brücke" mit dem Galvanometer und einer Tastervorrichtung bei *e* eingeschaltet. Die letztere wird immer erst einen Moment später als der Taster bei *a* geschlossen und ebenso früher geöffnet. Es geschieht dies, um etwaige Inductionsströme, welche, wie wir hören werden, durch den Schluss des Stromes bei *a* entstehen können, von dem Galvanometer fern zu halten *).

Wir machen schliesslich darauf aufmerksam, dass man in der Wheatstone'schen Vorrichtung stets das Galvanometer mit der Stromquelle vertauschen kann, da hierdurch die Richtigkeit der Widerstandsproportion nicht gestört wird. Auf dasselbe kommt man hinaus, wenn man die zu vergleichenden Widerstände in die Zweige *ab* und *ac*, die abgeglichenen in die Zweige *bd* und *cd* einschaltet. Letztere Anordnung ist dann empfehlenswerther, wenn der Widerstand der unverzweigten Leitung grösser ist, als jener in der Brücke.

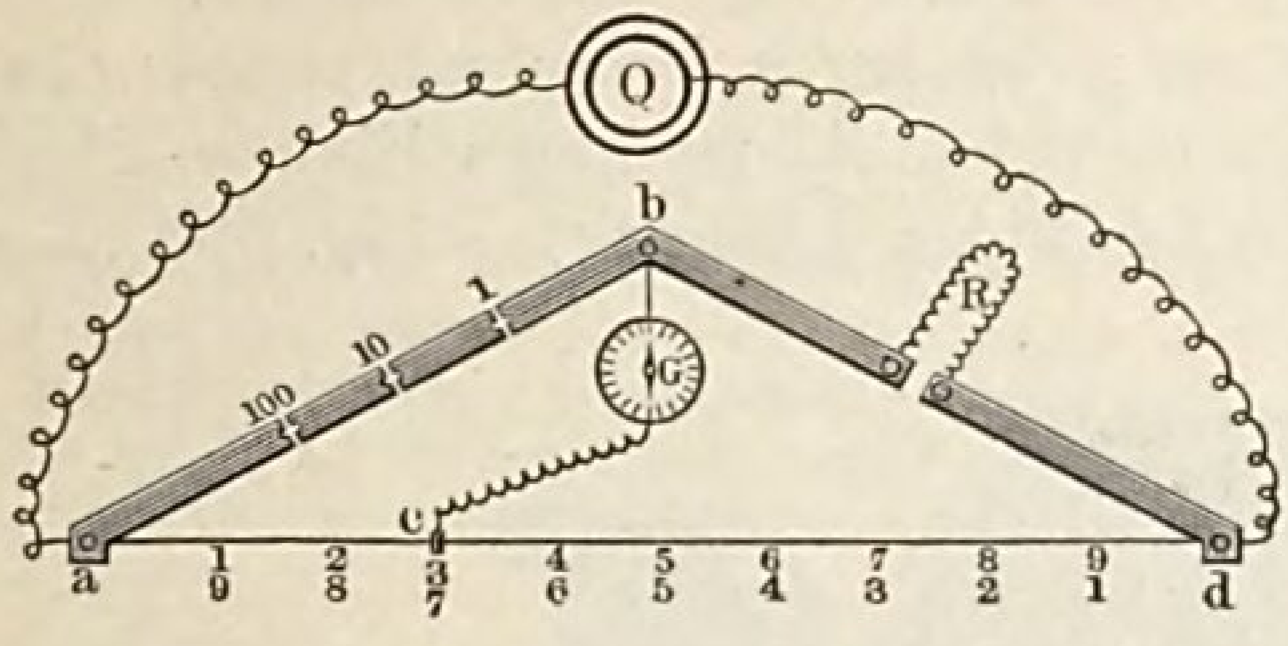
Die Kirchhoff'sche Brücke unterscheidet sich von der Wheatstone'schen nur dadurch, dass bei derselben nicht auf die Herstellung gleicher oder im Voraus gegebenem Verhältnisse stehender Widerstände, sondern auf die Ausmittelung des beliebigen Verhältnisses des zu messenden Widerstandes zu einem gegebenen bekannter Grösse ausgegangen

*) Es wird dies später erklärt werden. Aus demselben Grunde, nämlich um Inductionsströme zu vermeiden, werden die Rheostatdrähte auf den Spulen bifilar, d. h. hin- und zurückgehend (inductionsfrei), aufgewickelt.

wird. Die Fig. 398 giebt zunächst eine schematische Darstellung des Apparates.

Der Batteriestrom theilt sich wiederum bei *a* und *d* in die Zweige *abd* und *acd*. Die Brücke *bc* enthält das Galvanometer. Zwischen *a* und *b* sind ein oder mehrere bekannte, zwischen *b* und *d* der unbekannte zu messende Widerstand eingeschaltet. Der Brückendraht *bc* ist aber nur am Ende *b* befestigt, das andere Ende *c* ist auf dem Leiter *ad* beweglich. Dieser Leiter besteht aus einem homogenen, zwischen *a* und *d* geradlinig ausgespannten, mit einer Längentheilung versehenen Drahte. Die Theilung ist nach beiden Richtungen beziffert. Denken wir uns zwischen *a* und *b* den Widerstand 10 eingeschaltet, so verhält sich in dem gezeichneten Beispiele:

Fig. 398.



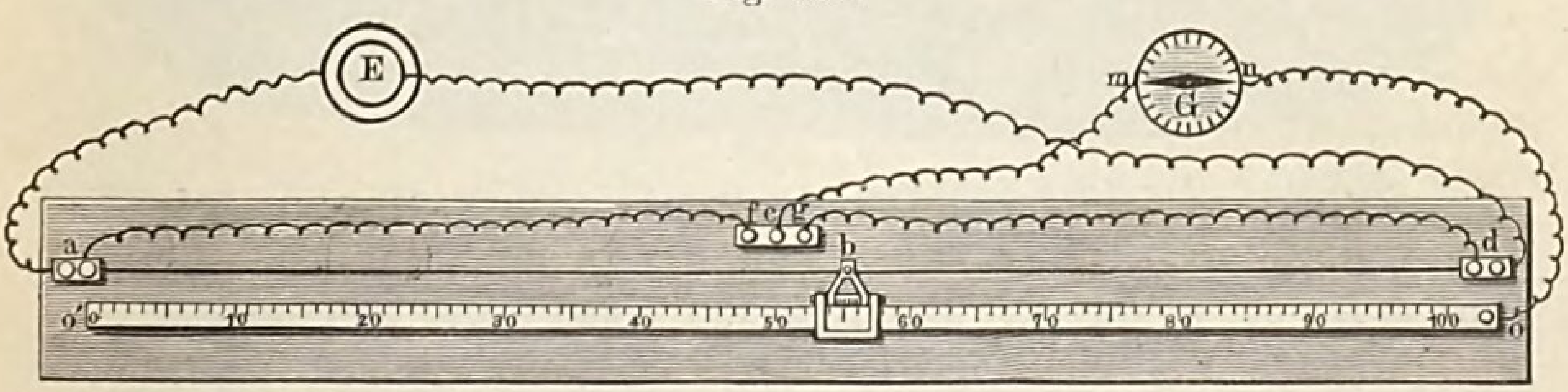
$$R : 10 = 7 : 3,$$

woraus

$$R = \frac{70}{3} = 23{,}33 \text{ Ohm.}$$

Die äussere Anordnung ist auch bei diesem Apparate sehr verschiedenartig; Fig. 399 zeigt eine solche in der von Siemens ausgeführten Form im Grundriss. Auf einem langen hölzernen Brette ist zwischen isolirten Klemmen der Platindraht *ad* ausgespannt. Parallel mit demselben befindet sich ein mit Längentheilung versehener Metallstreifen *o′o*, längs wel-

Fig. 399.

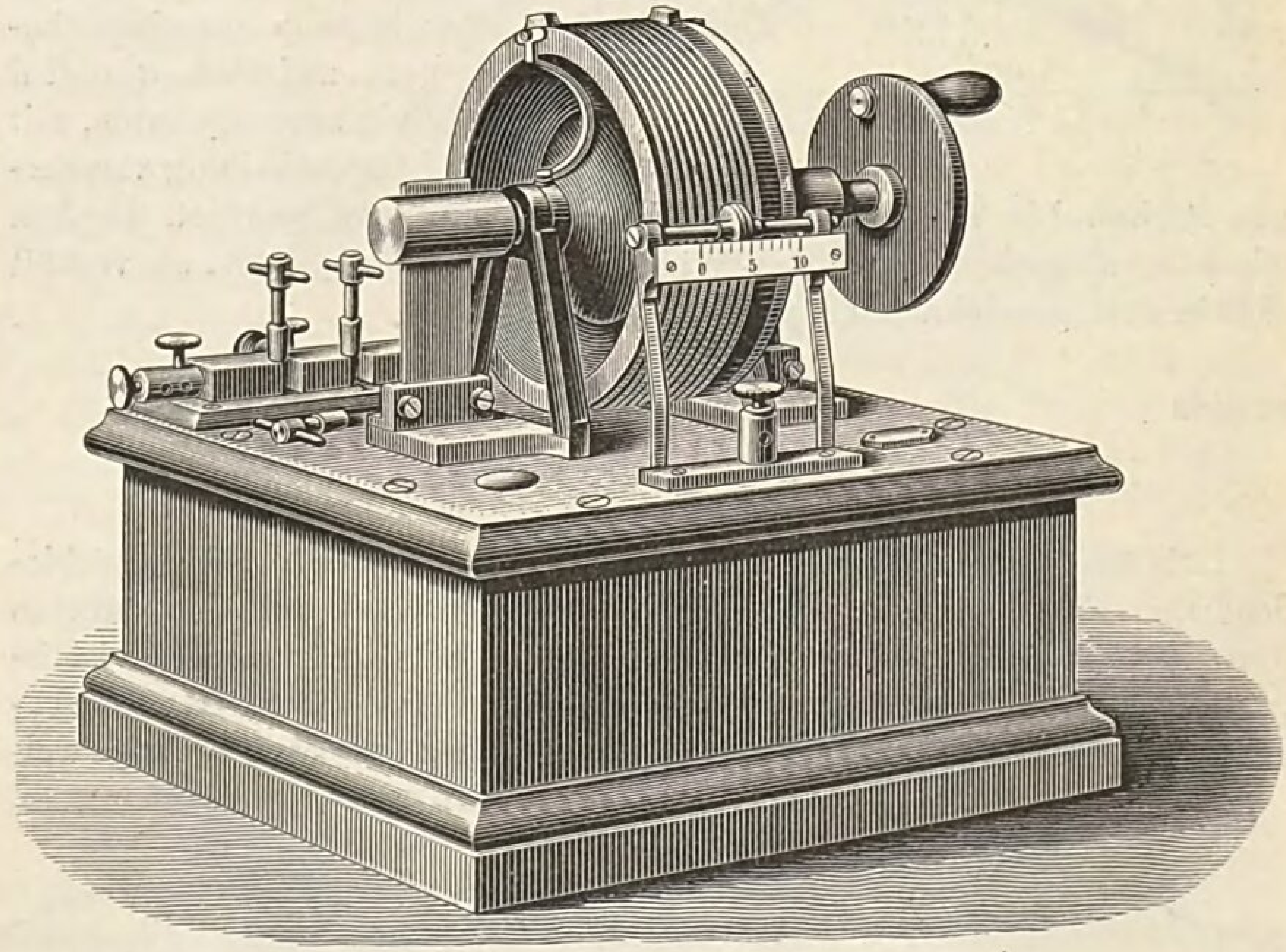


chem ein Schlitten mit Nonius gleitend verschiebbar ist. Dieser Schlitten trägt einen auf- und niederkippbaren Fortsatz, welcher sich mit einer metallenen Schneide auf den Platindraht niedersinken lässt, so dass hierdurch eine leitende Verbindung zwischen dem Metallstreifen *o′o* und einem Punkte *b* des Platindrahtes hergestellt wird. Rückwärts befindet sich ein Metallstück mit drei Klemmschrauben *f*, *c* und *g*, die unter sich leitend in Verbindung stehen. Zwischen *a* und *f* einerseits und zwischen *g* und *d* andererseits werden die zu vergleichenden Widerstände eingeschaltet. Ausserdem werden *a* und *d* mit den Polen des Elementes

E, *c* und *o* (oder *o'*) mit dem Galvanometer *G* verbunden. Die Buchstaben haben dieselbe Bedeutung wie im Schema Fig. 398; die Brücke wird daher durch die Leitung *cmnob* gebildet. Die Länge der Stücke *ab* und *bd* ist veränderlich und kann an dem Maassstabe abgelesen werden.

Dieses Verfahren setzt einen sehr gleichmässigen Messdraht voraus und darf nur mit geringen Stromstärken, also empfindlichem Galvanometer, ausgeführt werden, wenn nicht durch Temperaturänderungen Fehler entstehen sollen. Siemens hat übrigens diesen Einfluss durch einen abkühlenden Luftstrom zu beseitigen gesucht*). Fig. 400 zeigt

Fig. 400.



eine Wheatstone-Kirchhoff'sche Brücke nach F. Kohlrausch aus der Werkstätte von Hartmann und Braun in Bockenheim-Frankfurt a. M., bei welcher der Messdraht auf einer Walze aufgewickelt ist.

Wenn man mit den beschriebenen Brückenvorrichtungen Messungen ausführt, so bemerkt man leicht, dass die Bestimmung der kleinen Widerstände kurzer dicker Drahtleitungen ungenau wird, weil die Art ihrer Verbindung an den Enden, das mehr oder minder feste Anziehen der Klemmen, die mehr oder minder oxydfreie Oberfläche an den Berührungsflächen Unterschiede im eingeschalteten Widerstande herbei-

*) Weitere Verbesserungen dieses Apparates sind beschrieben in G. Wiedemann's Lehre v. d. Elektricität, Bd. I, S. 448; daselbst sind auch die Untersuchungen über die Genauigkeit des Verfahrens, die Graduirung des Messdrahtes und Einschlägiges nachzulesen.

führen kann, die manchmal grösser sind, als der Widerstand des Drahtes selber. Auf die gute metallische Verbindung an den Contactstellen ist daher sehr zu achten.

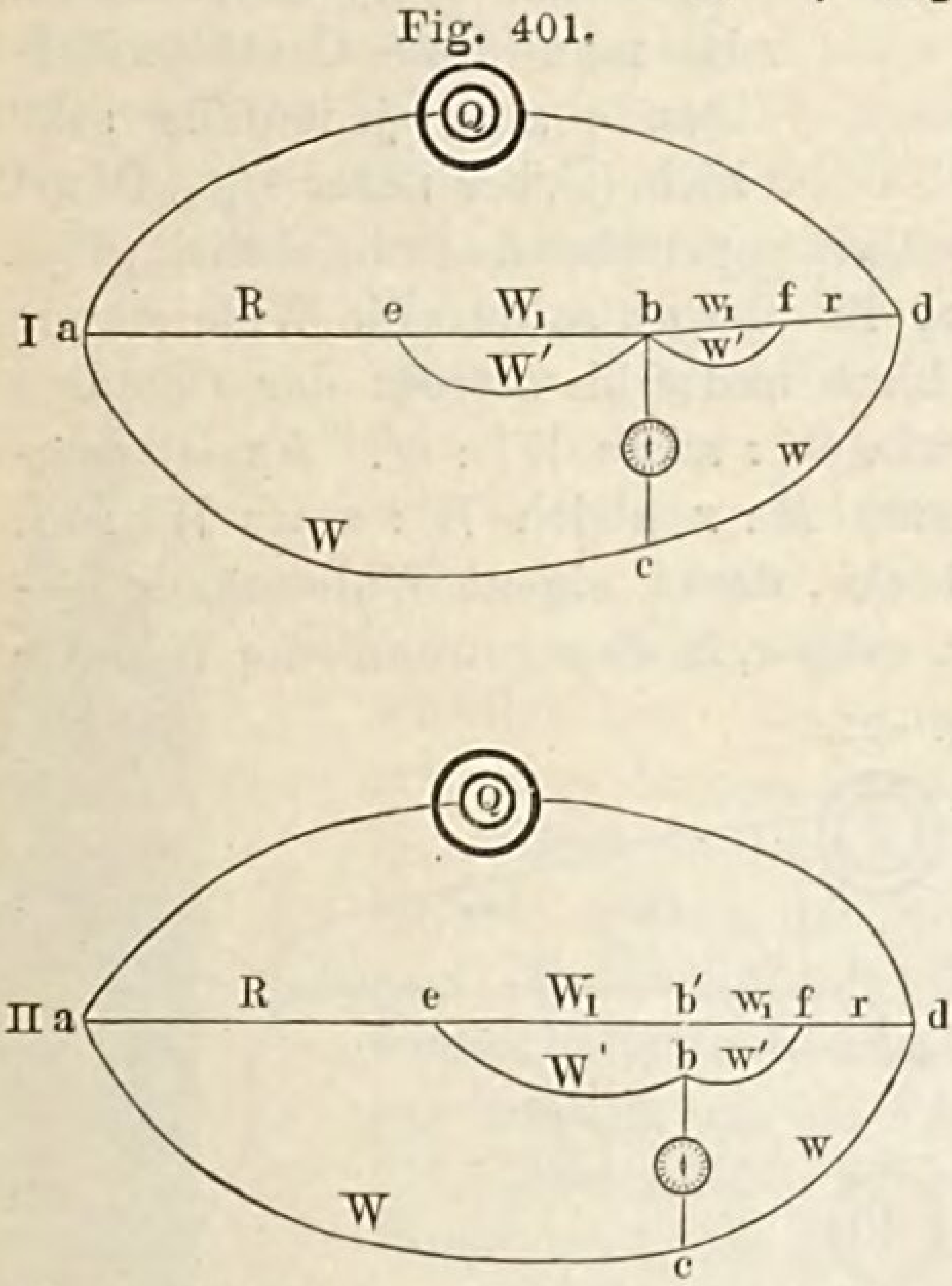
W. Thomson hat eine weitere Abänderung der Wheatstone'schen Brücke erdacht, bei welcher dieser Einfluss der Contactstellen eliminirt werden kann.

Man beachte zunächst die Verzweigung in Fig. 401 I, in welcher die einzelnen Widerstände durch die beigeschriebenen Buchstaben bezeichnet seien. Dieselben seien so gewählt, dass:

$$R : W : W' : W_1 = r : w : w' : w_1,$$

daraus folgt, dass auch der gemeinsame Widerstand der Parallelleitungen W' und W_1 welcher $= \frac{W' W_1}{W' + W_1}$ ist, sich zu dem gemeinsamen Widerstand $\frac{w' w_1}{w' + w_1}$ der Parallelleitungen w' und w_1 verhält wie $W : w$. Und da auch $R : r$ dasselbe Verhältniss hat, so verhalten sich die Gesammtwiderstände von a bis b zu jenen von b bis d wie $W : w$. Es geht daher über bc kein Strom. Nun beachten wir, dass, wie oben gezeigt wurde, an diesem Sachverhalte keine Aenderung erfolgen kann, wenn wir bei b die Leitung $W_1 + w_1$ von der Leitung $W' + w'$ abtrennen, wie in Fig. 401 II gezeichnet ist. Denn in einem Verbindungsstücke zwischen b und b' würde auch kein Strom vorhanden sein.

Fig. 401.

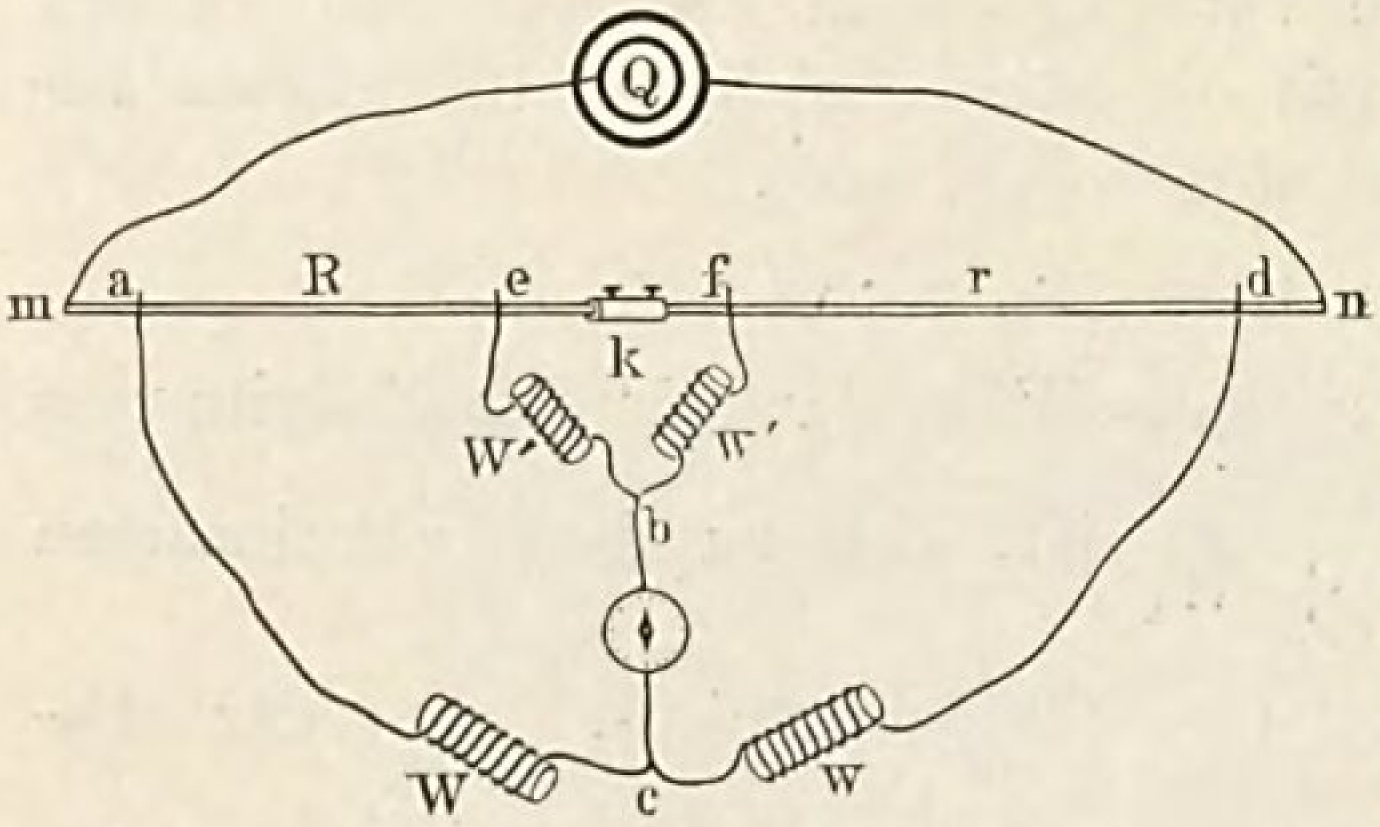


Daraus folgt, dass, wenn in einem Verzweigungsschema von der Fig. 401 II $W' : w' = W : w$ gilt und das Galvanometer keinen Strom anzeigt, auch $R : r = W : w$ gelten muss. Für den Fall, dass $W' = w'$ und $W = w$, beweist Abwesenheit des Brückenstromes, dass $R = r$.

Es seien nun in Fig. 402 (a. f. S.) mk und kn die beiden dicken Drahtstücke, deren Widerstände zu vergleichen sind. Das heisst, man soll auf dem einen Drahte mk zwei Punkte a und e aufsuchen, zwischen denen der Widerstand R liegt, welcher zu dem Widerstande r zwischen den Punkten f und d des anderen Drahtes kn in einem verlangten Verhältniss stehen soll (eventuell in dem Verhältniss Eins). Man verbindet die zu vergleichenden Drähte einerseits durch die Klemme k untereinander, andererseits ihre äusseren Enden mit der Stromquelle Q.

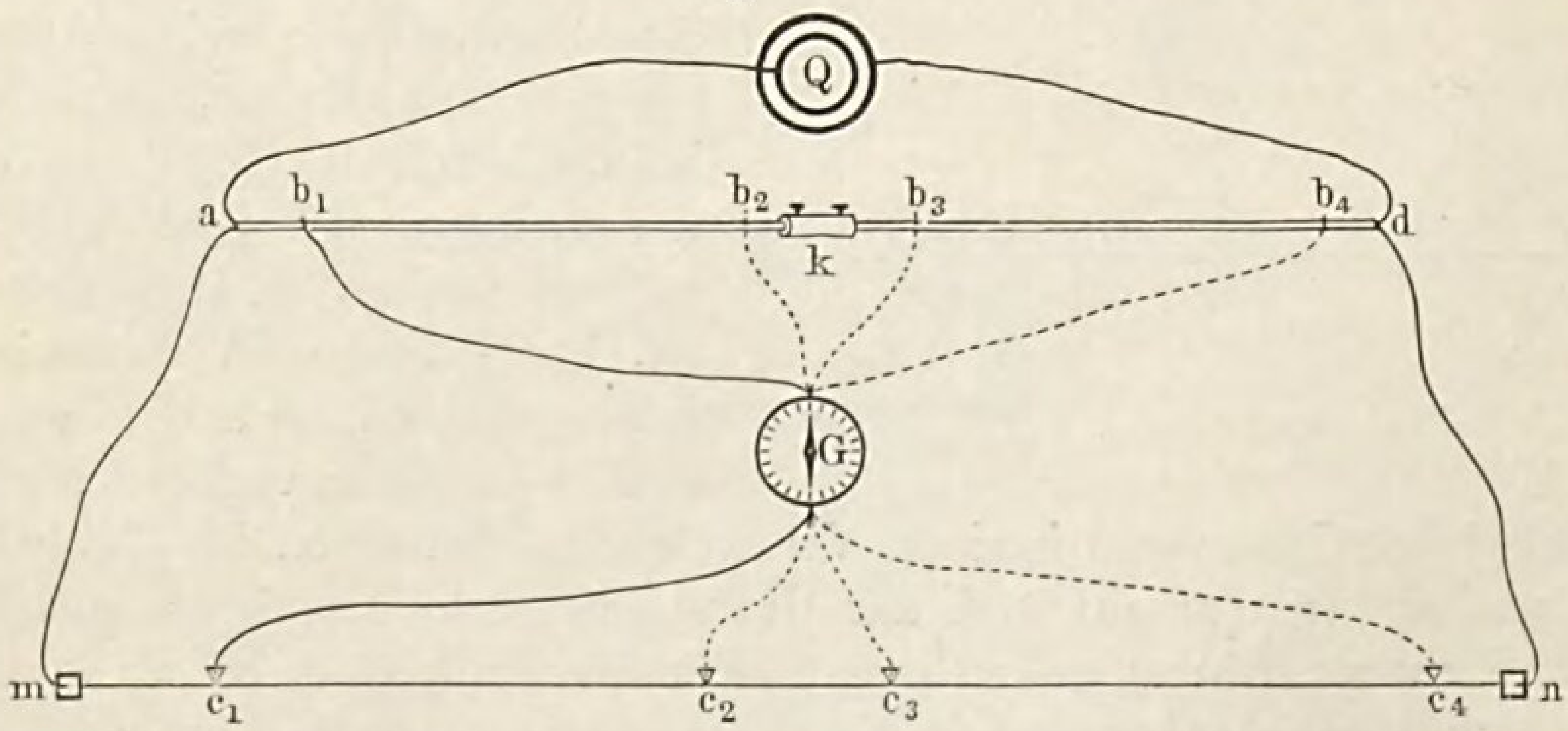
Hierauf verschafft man sich zwei Paare längerer Drähte, welche wohl isolirt auf Spulen gewickelt sein können, entsprechend den relativ grossen Widerständen W und w, sowie W' und w', wobei $W : w = W' : w'$ gleich dem verlangten Verhältnisse $R : r$ sein muss. Die Enden dieser Widerstandsdrähte werden einerseits an d und f, andererseits an dem Draht R aufgelegt und dort so lange verschoben, bis das Galvanometer keinen Strom zeigt. Nun kommen allerdings auch hier zu den Widerständen W, w, W' und w' der Drähte noch unbekannte kleine Contactwiderstände an den Auflegestellen a, e, f und d hinzu. Da man diese Contactwiderstände aber jedenfalls sehr klein (sicher unter $^1/_{1000}$ Ohm) machen kann, so verschwinden dieselben gegenüber den absichtlich gross gewählten Drahtwiderständen W, w, W' und w', so dass die Widerstände der Zweige von a bis c, d bis c, e bis b und f bis b trotz der Contacte in demselben Verhältnisse stehen, wie $W : w = W' : w'$. Es ist demnach das Verhältniss der Widerstände $R : r$ gleich $W : w = W' : w'$.

Fig. 402.



Hätte man die dicken Drahtstücke, deren eigene Widerstände beispielsweise unter $^1/_{100}$ Ohm betragen mögen, in eine gewöhnliche Wheatstone'sche Brücke eingeschaltet, so wäre durch eine Verschiedenheit im Contactwiderstande um $^1/_{1000}$ Ohm die Messung bis zu 10 Proc. fehlerhaft geworden.

Fig. 403.

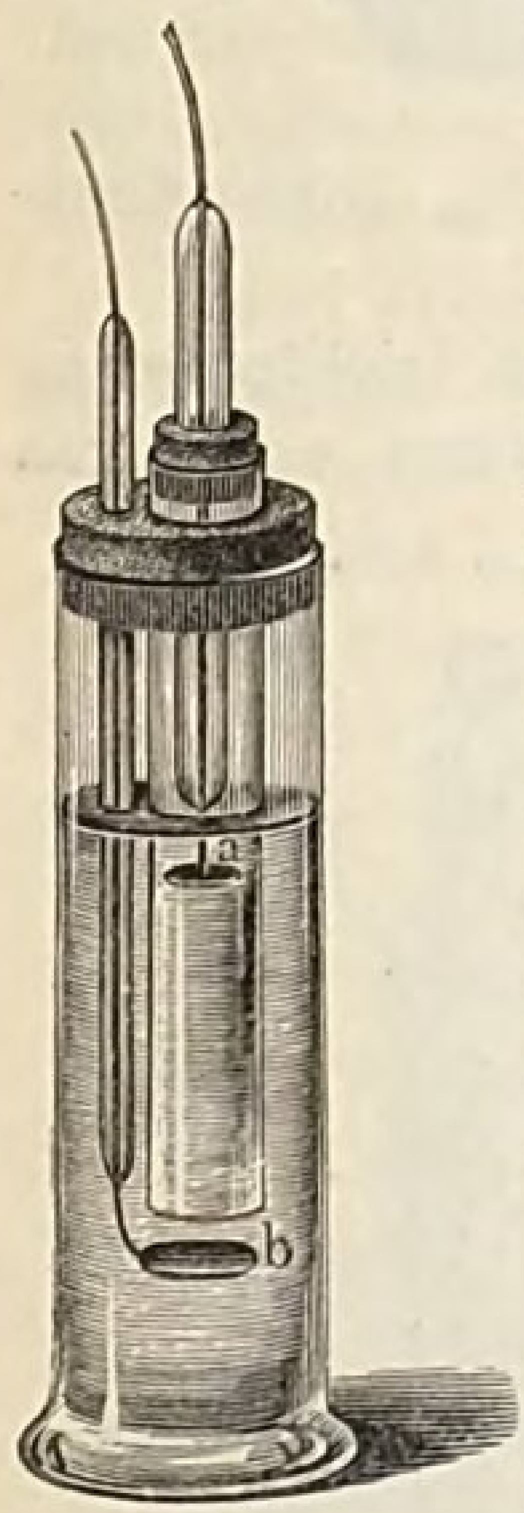


Denselben Zweck erreicht man auch mittelst der Methode von A. Matthiesen und Hockin. Es stellen in Fig. 403 ak und kd die zu vergleichenden Drahtstücke vor, welche bei k unter sich, bei a und d mit der Stromquelle verbunden sind. Zwischen m und n ist ein Messdraht (einer Wheatstone-Kirchhoff'schen Brücke) ausgespannt, dessen

Enden mit a und d verbunden sind. Der die Brücke bildende Draht $b_1 G c_1$ wird bei b_1 an das Ende des zu vergleichenden Stückes von ak, bei c_1 an eine Stelle angelegt, wobei kein Strom durch das Galvanometer geht. Ebenso sucht man die zusammengehörigen Punkte b_2 und c_2, b_3 und c_3, b_4 und c_4. Da den Punkten jedes dieser Paare je gleiche Potentialhöhe zukommen muss, so ist die Potentialdifferenz zwischen b_1 und b_2 gleich jener zwischen c_1 und c_2, sowie jene zwischen b_3 und b_4 gleich jener zwischen c_3 und c_4. Folglich verhalten sich die Widerstände $b_1 b_2 : b_3 b_4 = c_1 c_2 : c_3 c_4$ also auch wie die zugehörigen Drahtlängen des Messdrahtes. Je grösser man die Zuleitungswiderstände am und dn macht, desto weiter rücken die Punkte c_1 bis c_4 auseinander, desto grösser wird die Genauigkeit des Verfahrens.

Leitungswiderstand der Flüssigkeiten. Wollte man versuchen, den Leitungswiderstand einer Flüssigkeitssäule in der Weise durch einfache Substitution zu bestimmen, indem man die Flüssigkeitssäule in einen Stromkreis mit Galvanometer einschaltet und dafür so viel bekannten Widerstand ausschaltet, bis der Strom die ursprüngliche Stärke hat, so würde man nicht zu einem richtigen Resultate gelangen. Durch die früher schon erwähnte sogenannte Polarisation wird nämlich eine entgegengerichtete elektromotorische Kraft hervorgebracht, welche die Stromstärke verringert, so dass also der Widerstand grösser gefunden würde als er wirklich ist. Man umgeht diese Fehlerquelle, indem man die Flüssigkeitssäule von vornherein in den Kreis einschaltet und dann nur die Distanz der Metallplatten ändert, welche den Strom ab- und zuführen. Die Anzahl Widerstandseinheiten, die an dem gleichzeitig eingeschalteten Rheostaten aus- oder eingeschaltet werden müssen, um die Verlängerung oder Verkürzung der Flüssigkeitssäule zu compensiren, giebt dann den Widerstand der ein- oder ausgeschalteten Flüssigkeit. 139

Fig. 404.



Auf diesem Princip beruhen auch die Methoden, welche Becquerel, Horsford u. A. anwandten, um den Leitungswiderstand von Flüssigkeiten zu bestimmen.

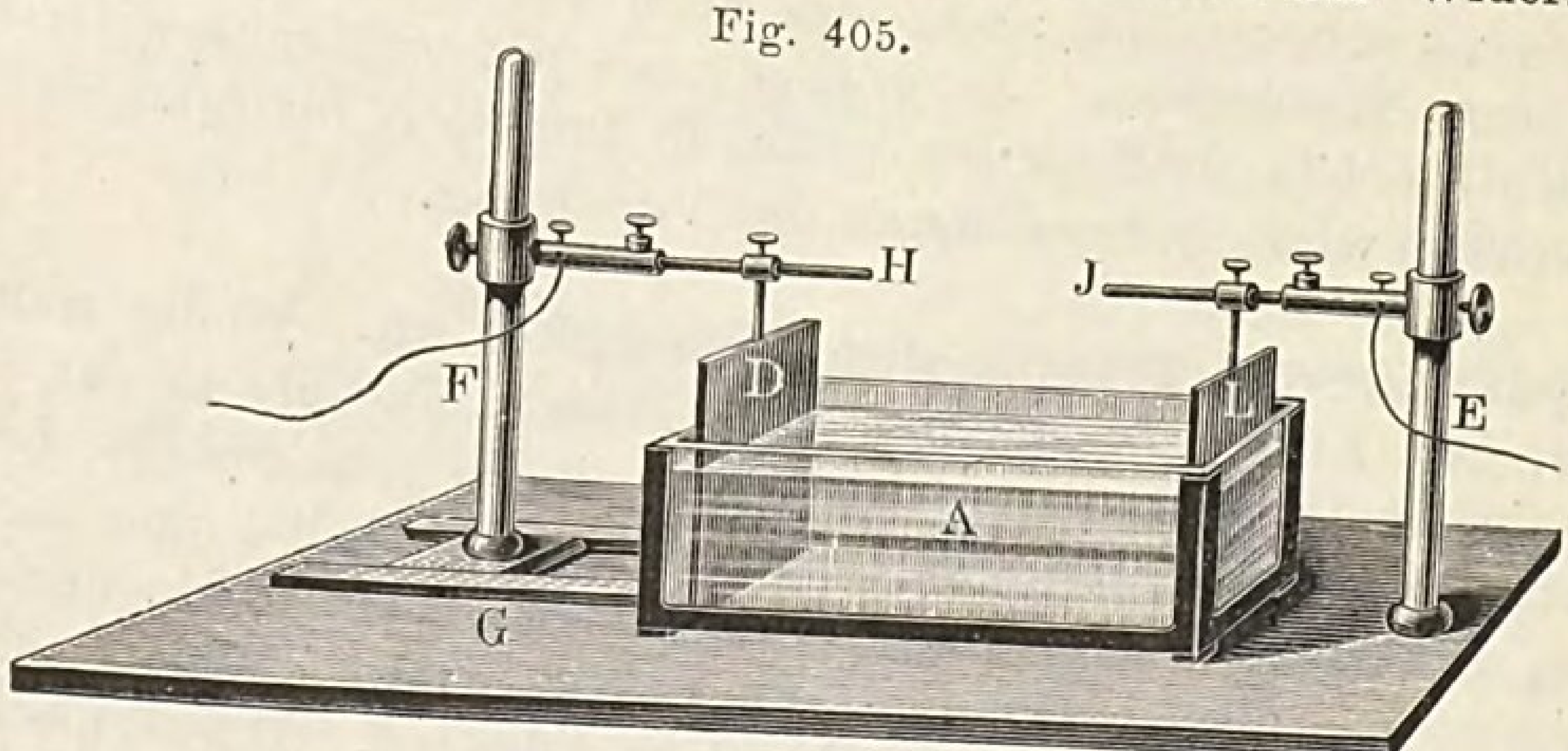
Becquerel bediente sich des Apparates Fig. 404, bei welchem die Polplatten a und b vertical über einander stehen und welcher wohl aus der Figur hinlänglich verständlich sein wird. Für den Fall, dass man mit Lösungen von Metallsalzen zu thun hat, aus welchen sich das Metall an der negativen Polplatte niederschlägt, bestehen die Polplatten aus demselben Metall, welches in der Lösung enthalten ist; für Flüssigkeiten aber, aus welchen sich Gase ausscheiden, besteht die untere Polplatte b, welche den positiven Pol bilden muss, aus einem Metall, welches durch den hier ausgeschiedenen Sauerstoff oxydirt wird, die obere aber, an

welcher sich das Wasserstoffgas ausscheidet, aus Platin. Diese Platinplatte *a* muss dann schräg gestellt oder durchbrochen sein, damit die Gasblasen leichter entweichen können.

Horsford bediente sich eines parallelepipedischen Troges, in welchen zwei, den Querschnitt möglichst ausfüllende Platinplatten eintauchten, Fig. 405.

F. Kohlrausch hat, um seltenere und kostbarere Stoffe in geringen Mengen untersuchen zu können, den Gefässen zur Widerstands-

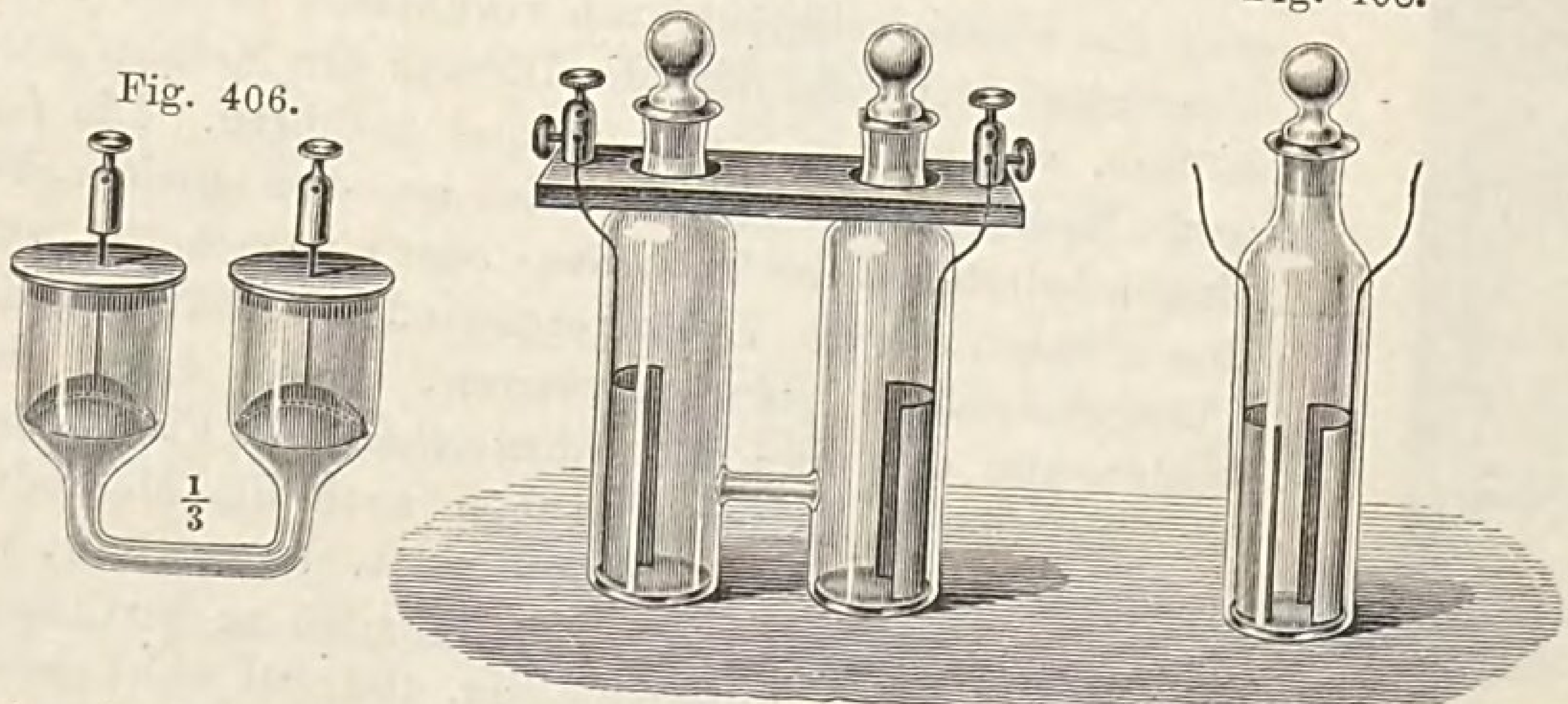
Fig. 405.



bestimmung die in den Figuren 406, 407 und 408 in $^1/_3$ Grösse abgebildeten Gestalten gegeben.

Fig. 406 besteht aus zwei Bechern, die sich unten trichterförmig verjüngen und durch ein gebogenes Rohr von 3 bis 9 mm verbunden

Fig. 407. Fig. 408. Fig. 406.



sind. Auf dem Rande des Trichters stehen platinirte Platinelektroden von kugelschaliger Gestalt; in der Mitte haben dieselben eine kleine Durchbohrung zum Entweichen der Luft. Die Stiele gehen durch Deckel von Hartgummi.

Der Apparat Fig. 407 gehört zur Untersuchung flüchtiger Flüssigkeiten und kann auch bei höherer Temperatur angewendet werden. Die Platindrähte sind in das Glas eingeschmolzen. Die Zuleitungsklemmen sind auf einem Stück Hartgummi befestigt.

Die Form Fig. 408 endlich ist für sehr schlecht leitende Flüssigkeiten bestimmt. Die Elektroden bedecken jede ein Drittel der Wandung und sind zur Befestigung an das Glas angeschmolzen.

Diese (von Günther Heym in Stützerbach angefertigten) Gefässe benöthigen nur 12 bis 25 ccm Flüssigkeit. Vor ihrem Gebrauche muss ihre Widerstandscapacität, d. h. der Widerstand des Quecksilbers von 0°, welches dieselben zwischen den Elektroden füllt, bestimmt werden. Man bewerkstelligt dies aber nicht direct mit Quecksilber, dessen Widerstand zu klein wäre, sondern mit einer der weiter unten angegebenen Flüssigkeiten von genau bekanntem Leitungsvermögen.

V. Beetz*) hat bereits den Einfluss der Polarisation durch öfteren Wechsel der Stromrichtung während des Versuches zu eliminiren versucht. F. Kohlrausch**) hat diesen Zweck in vollkommener Weise dadurch erreicht, dass er durch die Flüssigkeit einen rasch intermittirenden und dabei die Richtung wechselnden Strom sandte. Ein solcher Wechselstrom wird durch einen später zu besprechenden Inductionsapparat erhalten. In Folge des fortwährenden Polwechsels wird jede Polarisation durch die darauf folgende entgegengesetzte aufgehoben. Die Messung der Stromstärke ist in diesem Falle nicht mittelst eines gewöhnlichen Galvanometers möglich, wohl aber mittelst des später zu beschreibenden Elektrodynamometers von Weber.

Man kann auch die Wheatstone'sche Brücke verwenden und die Abwesenheit des Brückenstromes durch ein Telephon***) constatiren. Als Elektroden verwendete F. Kohlrausch auch ebene Spiralen von Platindraht.

Die früheren Bestimmungen des Leitungswiderstandes von Becquerel, Horsford, Schmidt, Becker und G. Wiedemann sind wohl durch die neuen umfangreichen und sorgfältigen Messungen des Leitungsvermögens von F. Kohlrausch, Grotian und Tollinger†) überholt worden. Da wir nicht den Raum erübrigen, um diese Bestimmungen ausführlich mitzutheilen, so wollen wir wenigstens zwei von F. Kohlrausch berechnete Tabellen für praktischen Gebrauch aufführen, welche die wichtigsten Resultate enthalten.

Die Tabelle I. (S. 476) bezieht sich auf verdünnte Lösungen bei einer Temperatur von 18° C. Für dieselben lässt sich das Leitungsvermögen durch empirische Gleichungen von der Form:

$$k = \alpha p - \beta p^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

darstellen, worin p den Procentgehalt der Lösung an der gelösten Substanz, α und β zwei Constanten bedeuten. Für sehr verdünnte Lösungen

*) Pogg. Ann. 117.

**) Pogg. Ann. 138.

***) Dasselbe wird später besprochen.

†) Pogg. Ann. CLIV, S. 215; CLIX, S. 233; Wiedem. Ann. VI, S. 1.

Tabelle I.

Gelöste Substanz	Chemische Formel derselben	α	β
Salzsäure	HCl	0,00000887	0,000000297
Aetzlithion	$LiOH$	„ 611	„ 327
Salpetersäure	HNO_3	„ 534	„ 101
Aetznatron	$NaOH$	„ 445	„ 153
Schwefelsäure	H_2SO_4	„ 415	„ 048
Bromwasserstoff	HBr	„ 383	„ 050
Aetzkali	KOH	„ 350	„ 055
Jodwasserstoff	HJ	„ 250	„ —
Aetzbaryt	BaO_2H_2	„ 196	„ 066
Salmiak	NH_4Cl	„ 177	„ 011
Lithiumcarbonat	Li_2CO_3	„ 175	„ 708
Oxalsäure	$H_2C_2O_4$	„ 167	„ 089
Saures Kaliumsulfat	$KHSO_4$	„ 165	„ 021
Cyankalium	KCN	„ 156	„ 012
Chlorlithium	$LiCl$	„ 160	„ 046
Chlormagnesium	$MgCl_2$	„ 150	„ 045
Chlornatrium	$NaCl$	„ 138	„ 025
Chlorcalcium	$CaCl_2$	„ 134	„ 027
Chlorkalium	KCl	„ 131	„ 004
Fluorkalium	KF	„ 131	„ 018
Ammoniumnitrat	NH_4NO_3	„ 116	„ 012
Ammoniumsulfat	$(NH_4)_2SO_4$	„ 112	„ 017
Kaliumcarbonat	K_2CO_3	„ 113	„ 016
Natriumcarbonat	Na_2CO_4	„ 103	„ 037
Chlorstrontium	$SrCl_2$	„ 098	„ 015
Kaliumoxalat	$K_2C_2O_5$	„ 097	„ 011
Lithiumsulfat	Li_2SO_4	„ 093	„ 036
Magnesiumnitrat	MgN_2O_6	„ 092	„ 020
Kalisalpeter	KNO_3	„ 092	„ 013
Kaliumsulfat	K_2SO_4	„ 091	„ 010
Natronsalpeter	$NaNO_3$	„ 090	„ 017
Glaubersalz	Na_2SO_4	„ 089	„ 024
Bromkalium	KBr	„ 087	„ 005
Calciumnitrat	CaN_2O_6	„ 087	„ 021
Chlorbaryum	$BaCl_2$	„ 077	„ 008
Saures Kaliumcarbonat	$KHCO_3$	„ 075	„ 010
Kaliumacetat	$KC_2H_3O_2$	„ 071	„ 013
Jodammonium	NH_4J	„ 070	„ — 003
Kaliumchlorat	$KClO_3$	„ 069	„ —
Natriumacetat	$NaC_2H_3O_2$	„ 067	„ 023
Phosphorsäure	H_3PO_4	„ 064	„ 011
Jodkalium	KJ	„ 063	„ — 001
Bittersalz	$MgSO_4$	„ 060	„ 021
Jodnatrium	NaJ	„ 057	„ 003
Jodlithium	LiJ	„ 057	„ 003
Baryumnitrat	BaN_2O_6	„ 054	„ 017
Saures Kaliumphosphat	KH_2PO_4	„ 052	„ 014
Silbersalpeter	$AgNO_3$	„ 051	„ 007
Alaun	$KAlS_2O_8$	„ 047	„ —
Zinkvitriol	$ZnSO_4$	„ 042	„ 012
Kupfervitriol	$CuSO_4$	„ 041	„ 011

Tabelle II.

Gelöste Substanz	Procentgehalt der Lösung	Specifisches Gewicht	Leitungsvermögen bei 18° C. im Verhältniss zum Quecksilber
HNO_3	29,7	1,185	0,00007330 *m*
HCl	18,3	1,092	„ 7174 *m*
HBr	36	1,31	„ 717 *m*
H_2SO_4	30,4	1,224	„ 6914 *m*
HF	—	—	„ 61 *m*?
KOH	28,1	1,274	„ 5095 *m*
NH_4J	$>$50	—	$>$„ 4000
KJ	58,5	1,70	„ 410
NH_4Cl	27	1,078	„ 398
KB_2	38,5	1,347	„ 348
$KHSO_4$	31	1,24	„ 344
NH_4NO_3	5,5	1,25	„ 343 *m*
$NaOH$	15,2	1,172	„ 3276 *m*?
KCl	25,8	1,175	„ 321
$LiOH$	11	1,12	„ 30
NaJ	64	2,0	„ 27
KF	33,7	1,308	„ 2427 *m*
$(NH_4)_2SO_4$	43	1,25	„ 2350 *m*
K_2CO_3	34,3	1,350	„ 2117 *m*?
$AgNO_3$	68	2,18	„ 210
$NaCl$	26,4	1,201	„ 2016
H_3PO_4	46,8	1,307	„ 1962 *m*
$SrCl_2$	34,4	1,38	„ 177
$K_2C_2O_4$	22,8	1,17	„ 170
$CaCl_2$	24,0	1,220	„ 1669 *m*
$NaNO_3$	40	1,32	„ 160 *m*
KNO_3	22,5	1,151	„ 1550 *m*
$LiCl$	21,2	1,122	„ 1533
LiJ	62	1,83	„ 15 *m*?
$BaCl_2$	26,1	1,284	„ 149
$MgCl_2$	19,4	1,170	„ 1312 *m*
$KC_2H_3O_2$	35,6	1,178	„ 1203 *m*
MgN_2O_6	28	1,25	„ 120 *m*
CuN_2O_6	—	—	„ 11 *m*
$KHCO_3$	20,8	1,15	„ 11
CaN_2O_6	26,7	1,238	„ 0983 *m*
$CaCl_2$	—	—	„ 09
Na_2SO_4	16,8	1,162	„ 0880
Na_2CO_3	17,5	1,187	„ 0812
K_2SO_4	10,0	1,081	„ 0806
$H_2C_2O_4$	7	1,033	„ 0734
Li_2SO_4	16	1,15	„ 064 *m*
$NaC_2H_3O_2$	21,8	1,114	„ 0610 *m*
BaO_2H_2	3,1	1,032	„ 0540
$MgSO_4$	17,3	1,187	„ 0456
$ZnSO_4$	23,7	1,285	„ 0452
$CuSO_4$	18,1	1,208	„ 0440
$KClO_3$	6,3	1,040	„ 0432
BaN_2O_6	8,4	1,071	„ 0330
KAl_2SO_4	6,4	1,061	„ 0300
Li_2CO_3	0,77	1,063	„ 0194
$C_4H_6O_6$	22,4	1,107	„ 0094 *m*
$C_2H_4O_2$	16,6	1,022	„ 00152 *m*
NH_3	5.3	0,977	„ 00104 *m*

verschwindet das Glied βp^2 und wird demnach $\alpha = \frac{k}{p}\cdot$ Die Constante α bedeutet also in diesem Falle das Verhältniss des Leitungsvermögens zu dem Gehalte, welche Grösse Kohlrausch das specifische Leitungsvermögen der gelösten Substanz nennt.

Ein Beispiel mag den Gebrauch der Tabelle I. erläutern. Man findet aus der ersten Zeile, dass für Salzsäure $\alpha = 0{,}00000887$, $\beta = 0{,}000000297$. Mithin wäre z. B. das Leitungsvermögen einer 5 procentigen Salzsäure

$$k = 0{,}00000887 \,.\, 5 - 0{,}000000297 \,.\, 25 = 0{,}000036925,$$

daraus ergiebt sich der Leitungswiderstand:

$$\frac{1}{k} = 27074,$$

das heisst, eine Quecksilbersäule von 0^0 und 27074 mm Länge bietet denselben Widerstand, wie eine gleich dicke Säule 5 procentiger Salzsäure bei 18^0 und einer Länge von nur 1 mm.

Für concentrirtere Lösungen gilt die Gleichung 1) nicht mehr oder nur mit Annäherung. Kohlrausch hat den Verlauf der Curven, nach welchen sich das Leitungsvermögen mit dem Procentgehalt ändert, in der citirten Abhandlung ausführlich mitgetheilt. Es ergab sich das Resultat, dass sehr viele Lösungen noch unterhalb ihres Sättigungspunktes ein Maximum des Leitungsvermögens besitzen, eine Thatsache, welche zuerst von Matteucci beobachtet wurde. Bei den übrigen Lösungen ist das Maximum des Leitungsvermögens durch ihren Sättigungspunkt begrenzt und steigt deshalb mit der Temperatur. Die Tabelle II. (S. 477) giebt hierüber Mittheilung. Sie enthält in der zweiten Spalte den Procentgehalt, welcher dem grössten Leitungsvermögen bei 18^0 C. entspricht. Die letzte Spalte enthält das Leitungsvermögen mit einem beigesetzten *m*, wenn das Maximum unter dem Sättigungspunkte der Lösung liegt. Das Leitungsvermögen ändert sich mit der Temperatur, und zwar steigt es mit derselben. Die Abhängigkeit wird durch den Temperaturcoëfficienten des Leitungsvermögens ausgedrückt, mit welchem Ausdrucke nach F. Kohlrausch der Zuwachs des Leitungsvermögens auf 1^0 Temperaturerhöhung, ausgedrückt in Theilen des Leitungsvermögens bei 18^0, bezeichnet wird. Dieser Coëfficient liegt nach den bisherigen Beobachtungen zwischen 0,0087 (bei $KHSO_4$) und 0,072 (bei $NaOH$ 43 Proc.), wechselt also innerhalb eines grossen Spielraums. Bei den verdünnten Lösungen dagegen ist er zwischen ziemlich engen Grenzen (0,0211 bis 0,0233) eingeschlossen.

Als Flüssigkeiten, die sich als Etalons für das elektrische Leitungsvermögen empfehlen, führt F. Kohlrausch folgende an:

Schwefelsäure vom maximalen Leitungsvermögen, d. h. 30,4 Proc. 1,224 specif. Gewicht

$$10^8 k = 6914 + 113\,(t - 18)$$

(t ist die Temperatur der Flüssigkeit).

Bittersalzlösung von 17,3 Proc. $MgSO_4$ (wasserfrei), 1,187 specifisches Gewicht

$$10^8 k = 456 + 11,9\,(t - 18).$$

Zinkvitriol (zuvor mit Zinkoxydhydrat gekocht) bei Arbeiten mit constantem Strome anzuwenden, besitzt bei 23,7 Proc. $ZnSO_4$, 1,285 specif. Gewicht und 18° C. die Werthe

	nach Beetz	Kohlrausch	Tollinger
$10^8 k =$	443	452	461

Kochsalzlösung in der Nähe von 18° gesättigt

$$10^8 k = 2015 + 45,1\,(t - 18).$$

Essigsäure vom maximalen Leitungsvermögen (16,6 Proc. $C_2H_4O_2$, 1,022 specif. Gewicht)

$$10^8 k = 15,2 + 0,27\,(t - 18).$$

Von den vielen, insbesondere für den Chemiker interessanten Beziehungen, welche F. Kohlrausch aus seinen ausgedehnten Untersuchungen abgeleitet hat, können wir einige erst bei der Besprechung der Elektrolyse mittheilen, müssen aber im Uebrigen auf die citirten Abhandlungen verweisen*). Hier möge nur noch die Frage nach dem Leitungsvermögen des Wassers beantwortet werden, welche Frage den Physikern grosse Schwierigkeiten bereitet hat.

Magnus fand das Leitungvermögen des reinen Wassers bei 20° im Verhältniss zum Quecksilber:

$$\lambda = 0,000000000133 = \frac{1,33}{10^{10}}.$$

Quincke fand

$$\lambda = 0,000000000216 = \frac{2,16}{10^{10}}.$$

F. Kohlrausch reinigte das Wasser durch folgeweise Destillation über übermangansaurem Kali, Aetzkali und saurem schwefelsaurem Kali, um organische Verbindungen zu zerstören, Säuren und Ammoniak zurückzuhalten. Zuletzt wurde dasselbe nochmals durch einen Platinkühler direct in die Platinschale destillirt, in welcher sofort die Widerstandsbestimmung vorgenommen wurde. Die Innenfläche dieser Schale bildete nämlich die eine Elektrode, eine concentrisch angebrachte kleinere

*) Insbesondere auch auf den Vortrag von F. Kohlrausch über „die gegenwärtigen Anschauungen über die Elektrolyse der Lösungen“ Berlin 1887.

Schale die andere Elektrode. F. Kohlrausch gelangte so bis zum kleinsten Werthe:

$$\lambda = \frac{0,52}{10^{10}},$$

hält jedoch auch diese Zahl nur für eine obere Grenze.

Demnach würde eine Wassersäule von 1 mm Länge denselben Widerstand darbieten, wie eine gleich dicke Kupfersäule ungefähr von der Länge der Mondbahn. Man kann daher auch wohl sagen, dass das ganz reine Wasser kein Stromleiter sei, also auch nicht merklich zersetzt werde.

Die geringsten Verunreinigungen geben aber dem Wasser merkliches Leitungsvermögen. Durch blosses Stehenlassen in der Platinschale unter einer Glasglocke stieg dasselbe von $\lambda = \frac{0,77}{10^{10}}$ binnen 5, 20, 80 Stunden auf $\frac{1,5}{10^{10}}, \frac{3,5}{10^{10}}, \frac{8,6}{10^{10}}$, binnen 44 Tagen auf $\frac{30}{10^{10}}$. Ein Milliontel Schwefelsäure oder Salpetersäure, d. h. ein Tropfen auf etwa 60 Liter, steigert das Leitungsvermögen auf das 10fache. Gewöhnliches Schnee- und Regenwasser lieferte die Werthe $\frac{4,1}{10^{10}}$ bis $\frac{19,8}{10^{10}}$, Quell- und Flusswasser leiten natürlich noch besser.

A. v. Waltenhofen hat gezeigt, dass Untersuchungen über das Leitungsvermögen des Wassers von Heilquellen interessante Aufschlüsse über ihre Vermischung mit Tagwässern sowie über ihre Veränderung oder Unveränderlichkeit in längeren Zeitepochen geben können*).

140 **Die Constanten der Volta'schen Rheomotoren.** Das Ohm'sche Gesetz gestattet uns, die Stromstärke zu berechnen, welche in einem Schliessungskreise von gegebenem Widerstande zu Stande kommt, wenn die elektromotorische Kraft und der innere oder wesentliche Widerstand des Rheomotors bekannt sind, von welchem der Strom ausgeht. Diese letzteren beiden Grössen, welche die Constanten des Rheomotors genannt werden, müssen daher zuerst bestimmt werden, wozu eine Anzahl von Methoden zur Verfügung stehen.

Die einfachste Methode zur Ermittelung dieser Grössen ist ohne Zweifel die Ohm'sche. Man schalte in den aus dicken und nicht zu langen Kupferdrähten gebildeten Schliessungsbogen des galvanischen Bechers, dessen Leitungswiderstand man bestimmen will, eine Tangentenbussole von verschwindend kleinem Widerstande ein und beobachte die Ablenkung, welche der Strom hervorbringt. Die entsprechende Stromstärke sei J, dann haben wir

$$J = \frac{e}{w},$$

*) Ueber die Thermen von Gastein. Wien. Akad. Ber. 92 (1885).

wenn e die elektromotorische Kraft und w den wesentlichen Widerstand des Rheomotors (den geringen Widerstand des gut leitenden Schliessungsbogens mitgerechnet) bezeichnet. Schaltet man nun einen ferneren Widerstand r von bekannter Grösse ein (wobei einer der in §. 130 besprochenen Rheostaten die besten Dienste leistet), so nimmt die Ablenkung der Nadel ab und dem geringeren Ablenkungswinkel entspricht die Stromstärke

$$J' = \frac{e}{w + r},$$

durch die Combination dieser beiden Gleichungen erhält man

$$w = \frac{J' r}{J - J'} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 1)$$

und

$$e = \frac{J J' r}{J - J'} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 2)$$

Beispiel: Ein Bunsen'sches Element sei durch kurze, dicke Drähte und eine Tangentenbussole von verschwindend kleinem Widerstande geschlossen. Der Reductionsfactor der letzteren auf Amp. sei = 6,0. Man beobachte einen Nadelausschlag von 54⁰ 45′. Nach Einschaltung von 0,2 Ohm Widerstand werde der Nadelausschlag 35⁰ 20′.

Man rechnet zunächst:

$$J = 6 \,.\, tang\ 54^0\ 45' = 6 \,.\, 1{,}414967 = 8{,}489802 \text{ Amp.}$$

$$J' = 6 \,.\, tang\ 35^0\ 20' = 6 \,.\, 0{,}708913 = 4{,}253478 \quad \text{"}$$

sodann $J - J' = 4{,}236324$ "

$$w = \frac{4{,}253478}{4{,}236324} \,.\, 0{,}2 = 0{,}2008 \text{ Ohm},$$

$$e = 8{,}489802 \,.\, 0{,}2008 = 1{,}70 \text{ Volt}.$$

Diese Methode setzt ein ganz constantes Element voraus und leidet an der Fehlerquelle, dass die elektromotorische Kraft selbst nicht unabhängig von der Stromstärke, und desto kleiner ist, je stärker der Strom. Auch ist nicht immer ein Galvanometer mit verschwindend kleinem Widerstande zur Verfügung; endlich wird der eingeschaltete Rheostatenwiderstand durch so starke Ströme leicht verändert. Man vermeidet diese Uebelstände zum Theil, indem man beide Male genügend grosse äussere Widerstände (den des Galvanometers eingerechnet) einfügt und die zugehörigen Stromstärken beobachtet. Entsprechen den äusseren Widerständen r_1 und r_2 die Stromstärken J_1 und J_2, so hat man:

$$J_1 = \frac{e}{w + r_1}, \quad J_2 = \frac{e}{w + r_2},$$

woraus

$$w = \frac{J_2 r_2 - J_1 r_1}{J_1 - J_2}, \quad e = \frac{J_1 J_2}{J_1 - J_2} (r_2 - r_1).$$

Wheatstone hat mehrere Methoden angegeben, von denen wir eine darlegen wollen. Man schliesst ein Element, dessen elektromotorische Kraft $= e$, dessen Widerstand $= w$, durch einen Rheostaten und ein Galvanometer, dessen Gesammtwiderstand $= R$ sei, und beobachtet den Ausschlag der Nadel. Sodann ersetzt man das eine Element durch zwei gleiche neben einander eingeschaltete Elemente und schaltet dann so viel Widerstand r ein, bis der Ausschlag wiederum derselbe ist wie früher.

Man hat zuerst

$$J = \frac{e}{w + R},$$

nachher

$$J = \frac{e}{\frac{w}{2} + R + r}$$

also

$$w = 2r.$$

Hat man J und R bestimmt, so erhält man dann auch e. Wenn es sich nur um die Bestimmung von w handelt, so braucht man kein Galvanometer, sondern nur ein Galvanoskop, weil der Strom nicht gemessen wird. Dasselbe Verfahren lässt sich auf eine grössere paarige Anzahl von gleichen Elementen ausdehnen.

Wenn es sich nur um die Aufgabe handelt, die elektromotorischen Kräfte zweier verschiedener Elemente mit einander zu vergleichen, so kann man sich der Fechner'schen Methode bedienen. Man schliesst nach einander jedes der Elemente durch einen Draht von sehr grossem Widerstande und durch ein Galvanometer, welches sehr schwache Ströme genau messen lässt (graduirter Multiplicator oder Spiegelgalvanometer). Es sei R der Widerstand des ganzen äusseren Schliessungskreises, w_1 und w_2 jener der Elemente, e_1 und e_2 ihre elektromotorischen Kräfte, J_1 und J_2 die beobachteten Stromstärken. Man hat dann:

$$J_1 = \frac{e_1}{w_1 + R}, \quad J_2 = \frac{e_2}{w_2 + R},$$

woraus

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{J_1}{J_2} \cdot \frac{w_1 + R}{w_2 + R}.$$

Sind nun w_1 und w_2 verschwindend klein gegen R, so ist

$$\frac{w_1 + R}{w_2 + R}$$

gleich 1 zu setzen, und man hat mit genügender Annäherung

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{J_1}{J_2}.$$

Sind w_1, w_2 und R wenigstens annähernd bekannt, so wird das Verfahren noch genauer. Die Einrichtung des Spiegelgalvanometers werden wir weiter unten besprechen. Hat man kein strommessendes Instrument, sondern nur ein Galvanoskop zur Verfügung, welches die Gleichheit der Stromstärke constatiren lässt, so ist folgende Methode anwendbar.

Man schliesst nach einander beide Elemente durch Rheostat und Galvanoskop und stellt den Rheostaten so ein, dass beide Male derselbe Strom herrscht. Ist nun der Widerstand des Galvanoskops gleich g, jener der eingeschalteten Rheostatwindungen beim ersten Elemente R_1, beim anderen R_2, so gilt

$$\frac{e_1}{w_1 + g + R_1} = \frac{e_2}{w_2 + g + R_2}.$$

Sind wiederum w_1 und w_2 sehr klein gegen die anderen Widerstände so kann man setzen:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{g + R_1}{g + R_2}.$$

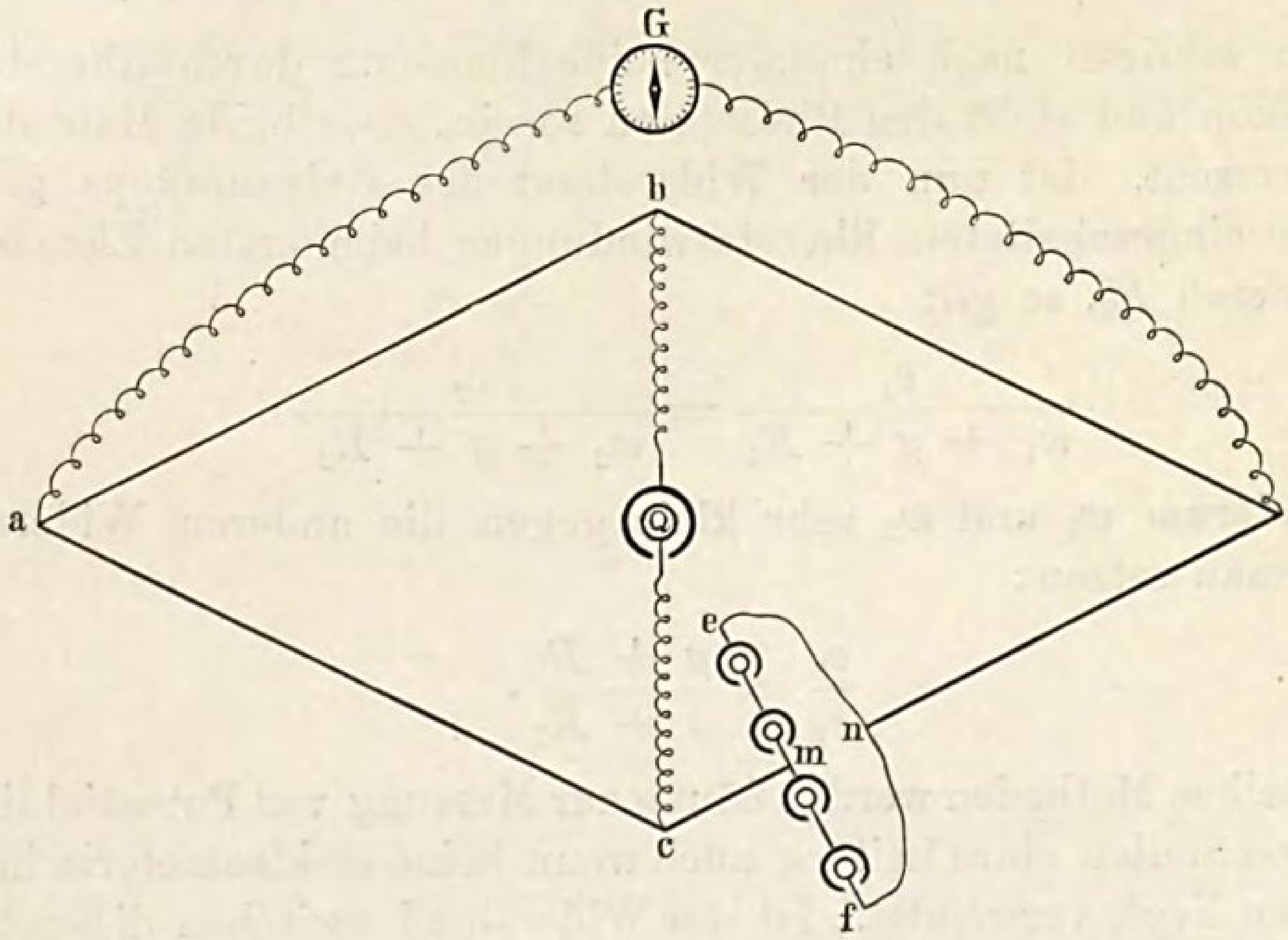
Dieselben Methoden werden häufig zur Messung von Potentialdifferenzen an zwei Stellen eines Leiters, auch wenn keine elektromotorische Kraft dazwischen liegt, verwendet. Ist der Widerstand zwischen diesen Stellen klein im Verhältniss zum Widerstande der Nebenleitung, die durch das Galvanometer geht, so kann man den Einfluss der letzteren vernachlässigen und die Scalenausschläge proportional der zu messenden Potentialdifferenz setzen. Man braucht dann nur das Galvanometer mittelst einer bekannten elektromotorischen Kraft zu aichen, indem man z. B. die Enden der Nebenleitung an ein Daniell'sches Element ansetzt.

V. v. Lang*) hat eine Methode zur Messung des Widerstandes und der elektromotorischen Kraft einer geraden Anzahl von Elementen angegeben, welche wegen der später mitzutheilenden Anwendung zur Messung der elektromotorischen Kraft des elektrischen Lichtbogens interessant ist. Es stelle *ef*, Fig. 409 (a. f. S.), eine Batterie von vier hinter einander geschalteten gleichen Elementen vor. Man sucht zunächst auf deren Schliessungsbogen einen Punkt *n*, welcher mit einem Punkte *m* in der Mitte der Batterie das gleiche Potential hat, so dass also kein Strom entsteht, wenn man *m* über *ca* und *n* über *d* zum Galvanometer *G* führt, während man die übrigen Zweige *ab*, *bd* und *cb* oder auch *bc* allein offen hält. Ist dies geschehen, so kann man die Batterie *ef* an den beiden Punkten *m* und *n* in den Zweig *cd* der Wheatstone'schen Brückenvorrichtung einschalten, wie die Figur es zeigt, und ihren Widerstand wie gewöhnlich messen, indem man in die Zweige *ab* und *bd* gleiche Widerstände, in den Zweig *ac* einen Rheostaten einschaltet. Offenbar ist das so erhaltene Resultat gleich dem vierten Theile des Widerstandes

*) Wiener Akad. Ber. 91, II, 1885, S. 844.

der Batterie *ef*, also direct gleich dem Widerstande eines Elementes derselben. Misst man auch noch die Stromstärke in dem Zweige *men*, so erhält man auch die elektromotorische Kraft.

Fig. 409.



Der wesentliche Widerstand der Rheomotoren ist selbstverständlich nicht, wie die elektromotorische Kraft, von der Zusammensetzung des Elementes allein, sondern insbesondere auch von der Grösse der Elemente, der Dicke der Flüssigkeitsschicht, der Beschaffenheit der Thonzelle etc. abhängig. Der wesentliche Widerstand der gebräuchlichen Bunsen-Elemente von 22 cm Höhe beträgt 0,05 bis 0,2 Ohm, je nach der Concentration der Säuren.

141 **Messung der Constanten mittelst der Compensationsmethoden.** Die Compensationsmethoden dienen dazu, die elektromotorische Kraft oder auch den Widerstand solcher Elemente, welche während des Stromschlusses eine Veränderung erleiden, zu messen; auch führen sie bei den nahe constanten Elementen zu genaueren Werthen, als die früher beschriebenen Methoden. Sie beruhen darauf, den Strom des zu untersuchenden Elementes gar nicht zu Stande kommen zu lassen, sondern ihn durch einen gleich starken Gegenstrom zu compensiren.

I. Poggendorff's Compensationsmethode.

A. Das zu untersuchende Element $K_2 Z_2$ mit der unbekannten elektromotorischen Kraft E_2 wird mit einem constanten Elemente $K_1 Z_1$ von bekannter elektromotorischer Kraft E_1, ferner mit einem Rheostaten R und einem Galvanoskop G in der Weise verbunden, wie es die Abbildung, Fig. 410, und deren Grundschema, Fig. 411, darstellt.

Bezeichnen wir

mit R_1 und J_1 Widerstand und Stromstärke in dem Zweige $B Z_1 K_1 C$
„ R_2 „ J_2 „ „ „ „ „ „ $B Z_2 K_2 G C$
„ R „ J „ „ „ „ „ „ $B R C$.

Fig. 410.

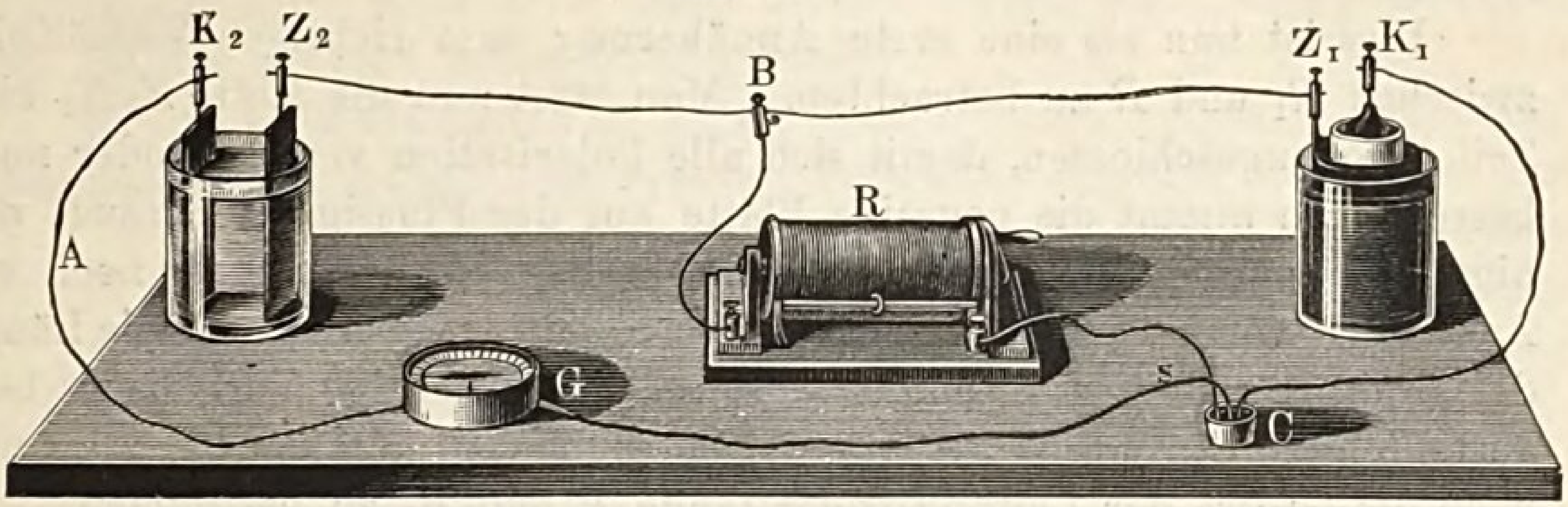
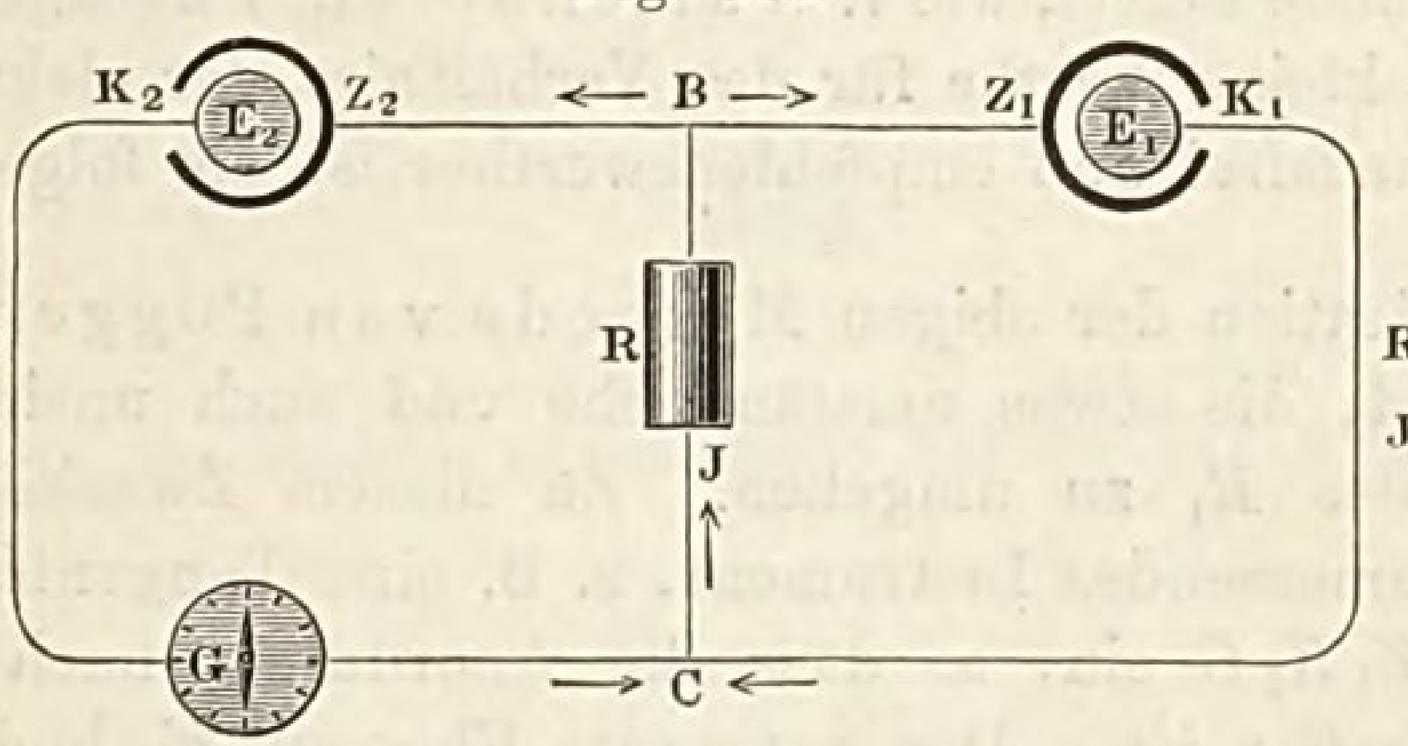


Fig. 411.



Nach §. 137 gelten dann im Allgemeinen die Beziehungen:

$$J_1 = \frac{E_1 (R_2 + R) - E_2 R}{R_1 R_2 + R(R_2 + R_2)}, \qquad J_2 = \frac{E_2 (R_1 + R) - E_1 R}{R_1 R_2 + R (R_1 + R_2)},$$

$$J = \frac{E_1 R_2 + E_2 R_1}{R_1 R_2 + R(R_1 + R_2)}.$$

Es ist also möglich, den Strom J_2 = Null zu machen, wenn man

$$E_2 (R_1 + R) = E_1 R$$

macht, d. h. wenn man den Widerstand R so regulirt, dass

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{R_1 + R}{R}$$

wird. Hat man daher versuchsweise R so lange verändert, bis beim Eintauchen der Drahtenden in den Quecksilbernapf C das Galvanoskop keinen Ausschlag giebt, so ist dann

$$E_2 = E_1 \frac{R}{R + R_1}.$$

Natürlich kann man die richtige Länge des Drahtes zwischen B und C nicht gleich auf den ersten Wurf treffen, vielmehr wird in der

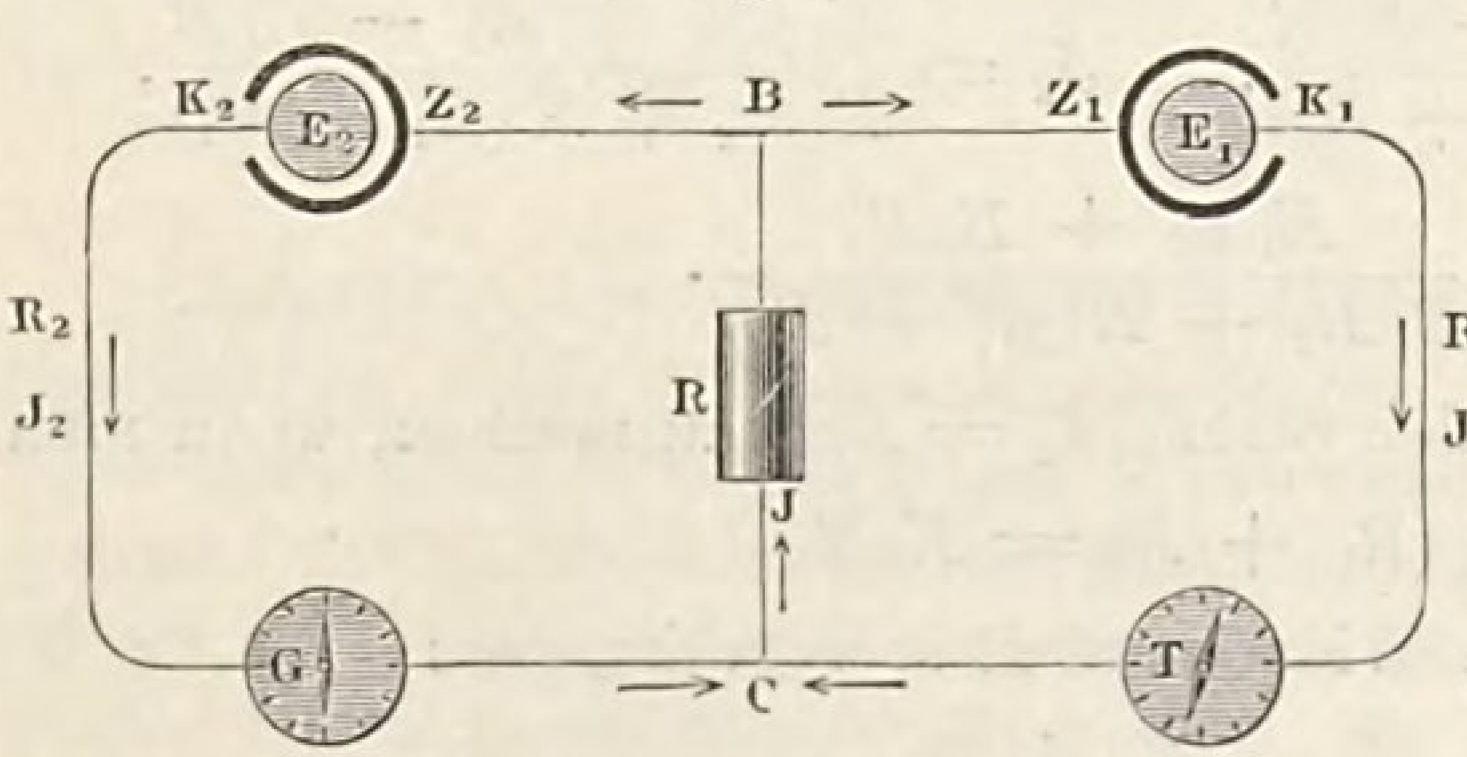
Regel, wenn man bei C schliesst, die Multiplicatornadel nach der einen oder der anderen Seite abweichen, je nachdem der Widerstand zwischen B und C zu klein oder zu gross ist. Mittelst des Rheostaten kann man nun aber die Grösse dieses Widerstandes so reguliren, dass der Multiplicator entweder gar keinen oder doch nur einen ganz schwachen Strom anzeigt.

Dies ist nun als eine erste Annäherung zum richtigen Verhältniss zwischen R_1 und R zu betrachten. Man lässt nun die Kette $Z_2 K_2$ eine Zeit lang ungeschlossen, damit sich alle Polarisation verliere, oder noch besser, man nimmt die negative Platte aus der Flüssigkeit heraus, reinigt sie und setzt sie wieder an ihre Stelle. Entsteht nun noch ein Ausschlag, wenn man bei C schliesst, so regulirt man abermals die Länge des Drahtes zwischen B und C, bis man das richtige Verhältniss hergestellt hat. Um den Werth von E_2 berechnen zu können, hat man nur noch die Grösse der Leitungswiderstände R und R_1 zu bestimmen.

Diese Methode liefert, wie v. Waltenhofen*) nachgewiesen, immer noch etwas zu kleine Werthe für das Verhältniss der elektromotorischen Kräfte. Einwurfsfrei und empfehlenswerther ist die folgende

B. Modification der obigen Methode von Poggendorff, die es auch ermöglicht, die etwas umständliche und auch unsichere Messung des Widerstandes R_1 zu umgehen. Zu diesem Zwecke schaltet man noch ein strommessendes Instrument, z. B. eine Tangentenbussole T, in den Zweig $B Z_1 K_1 C$ ein, so dass die Anordnung nach dem Schema, Fig. 412, beschaffen ist. Das constante Element E_1 bleibt an Ort und Stelle, dagegen werden die beiden zu vergleichenden Elemente E_2 und e_2 nach einander an die Stelle E_2 gesetzt und jedesmal der Widerstand des Rheostaten so regulirt, dass in G kein Ausschlag erfolgt. Es seien die den beiden Elementen E_2 und e_2

Fig. 412.



entsprechenden Stromstärken in R bezeichnet mit J und i, die an dem Galvanometer T abgelesenen J_1 und i_1, die dazu erforderlichen Widerstände zwischen B und C seien R und r. Nach Kirchhoff's zweitem Satze folgt für den linksseitigen Kreis

$$E_2 = RJ = RJ_1$$
$$e_2 = ri = ri_1,$$

*) Wien. Akad. Ber. Bd. 49 (1864).

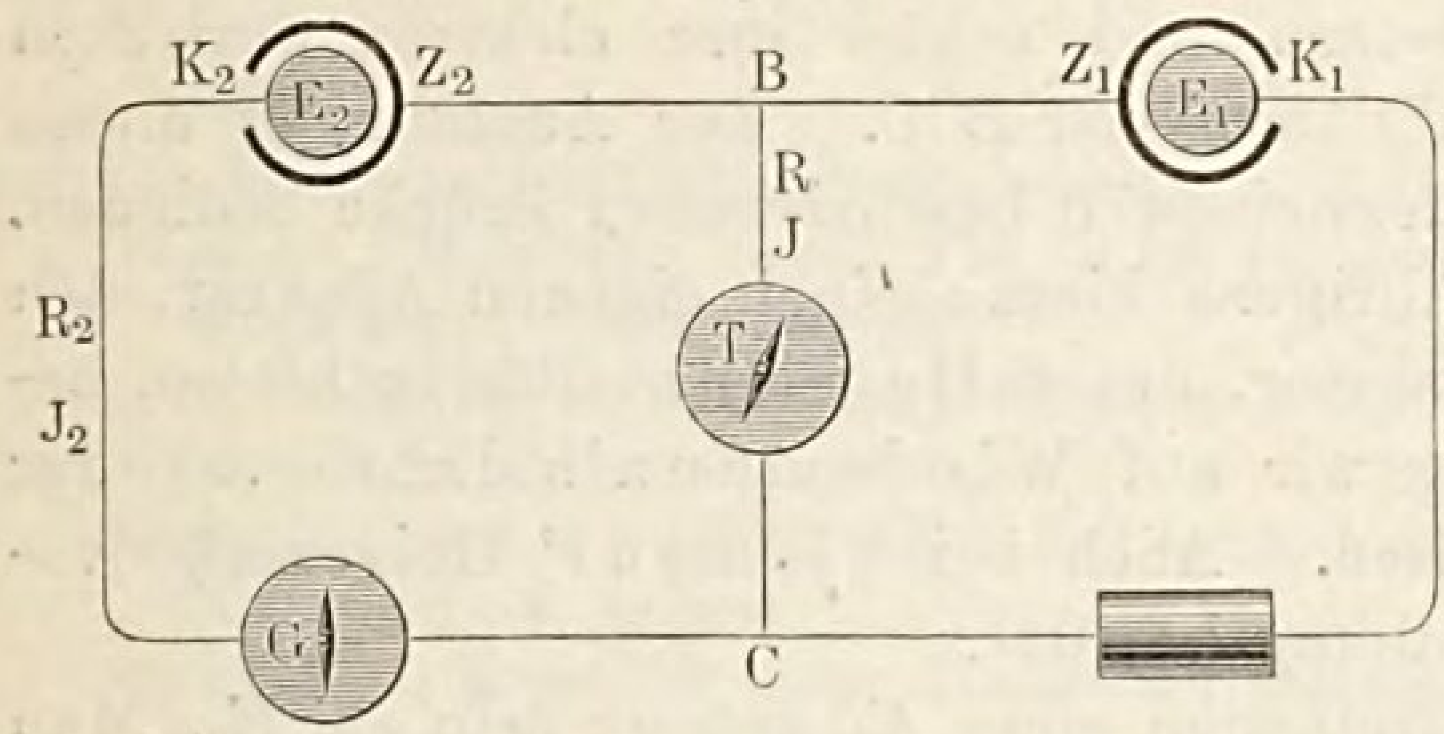
da nämlich der Strom $J_2 = 0$ ist, so ist $J = J_1$ und $i = i_1$. Mithin folgt:

$$\frac{E_2}{e_2} = \frac{R J_1}{r i_1}.$$

Man kann natürlicher Weise das Galvanometer T auch in den Zweig BC einschalten, muss aber dann seinen Widerstand berücksichtigen, was bei der anderen Anordnung wegfällt.

C. A. v. Waltenhofen's Modification der Poggendorff'schen Methode*) beruht auf dem Schema Fig. 413, welches aus jenem der Fig. 412 durch Vertauschung des Rheostaten mit dem Galvanometer T hervorgeht. Hat man für zwei verschiedene elektromotorische Kräfte E_2 und e_2 im linksseitigen Kreise durch Stellung des Rheostaten den Strom J_2 auf Null gebracht, so gilt, wenn wir die beiden zugehörigen Stromstärken in BC mit J und i bezeichnen:

Fig. 413.



$$E_2 = RJ$$
$$e_2 = Ri$$

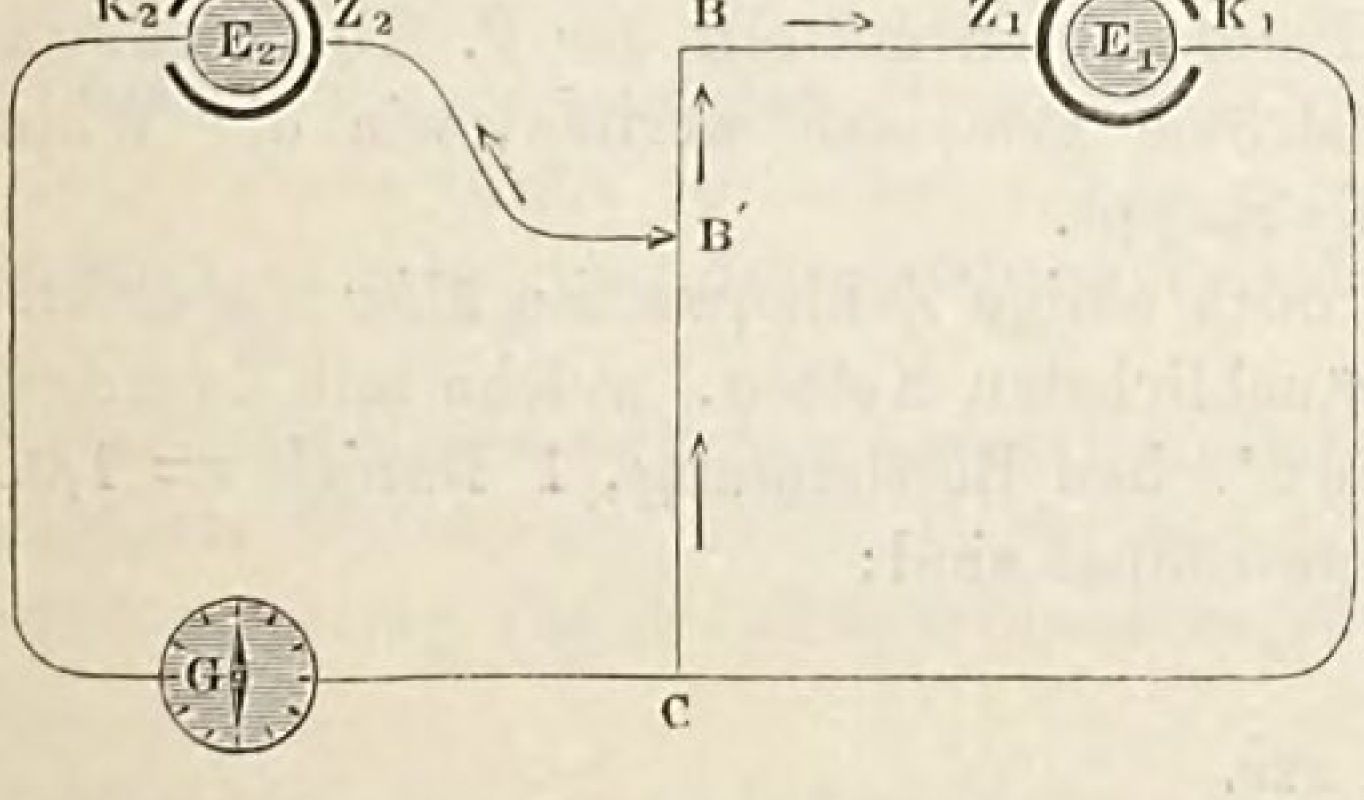
mithin:

$$\frac{E_2}{e_2} = \frac{J}{i}.$$

In diesem Falle wird also die Messung der elektromotorischen Kraft statt durch einen Widerstand durch eine Stromstärke bewerkstelligt.

II. E. du Bois-Reymond hat eine Compensationsmethode angegeben, welche aus dem Schema Fig. 411 auf folgende Weise hervorgeht. Denkt man sich nämlich statt des Rheostaten R einen einfachen, zwischen B und C ausgespannten Platindraht und denkt sich ferner das Ende B des Drahtes $Z_2 B$ längs dieses Drahtes gegen C verschiebbar (Fig. 414), so wird dadurch Widerstand von R weggenommen und dafür zu R_1

Fig. 414.



*) Dingl. J. 172, S. 27, 1864.

zugelegt. Die Summe $R + R_1$ bleibt dabei unverändert, wogegen R verändert wird. Da bei dieser Anordnung, wie wir oben gezeigt,

$$E_2 = E_1 \frac{R}{R + R_1}$$

ist, worin nun $R + R_1$ eine Constante $= K$ ist, so erhält man

$$E_2 = E_1 \frac{R}{K}.$$

Bei gleichbleibendem Apparate, d. h. wenn $\frac{E_1}{K}$ unverändert bleibt, kann man daher E_2 der Reihe nach durch verschiedene mit einander zu vergleichende Elemente ersetzen und erhält ihre elektromotorischen Kräfte proportional der Drahtlänge von $B'C$. Zur Ausführung dieses Verfahrens kann man sich der Seite 470 beschriebenen Brücke bedienen. Du Bois-Reymond hat übrigens hierzu einen eigenen Apparat, den nach ihm benannten Compensator, durch Halske ausführen lassen, bezüglich dessen Beschreibung wir auf Wiedemann's Lehre von der Elektricität I, S. 645 verweisen. Auch bei Siemens' Universalgalvanometer wird dieselbe Anordnung benutzt.

Bei den beschriebenen Methoden muss E_1 grösser sein als E_2. Man verwendet zweckmässig für E_1 ein oder zwei Bunsen'sche Elemente und vergleicht die zu untersuchenden Elemente mit einem Daniell'schen, indem man dieselben an der Stelle von E_2 mit einander vertauscht.

Man vermeidet auf diese Weise eine Fehlerquelle, auf welche A. v. Waltenhofen*) aufmerksam gemacht hat und welche darauf beruht, dass die compensirte Kette einen polarisirenden Einfluss auf die compensirende stärkere ausübt.

Betreffs weiterer Modificationen der Compensationsmethoden zur Messung elektromotorischer Kräfte von Bosscha, v. Beetz, Paalzow, Raoult etc., sowie bezüglich ihrer Anwendung zur Messung des wesentlichen Widerstandes der Ketten durch v. Waltenhofen, v. Beetz müssen wir auf das mehrfach citirte Handbuch von G. Wiedemann verweisen. Wir bemerken nur noch, dass die Widerstände galvanischer Elemente am genauesten und einfachsten mittelst der F. Kohlrausch'schen Methode der Wechselströme gemessen werden, wie die Widerstände der flüssigen Leiter überhaupt.

Wir geben zum Schluss noch einige Zahlenwerthe über die elektromotorischen Kräfte der gebräuchlichsten Ketten, welche mit Zugrundelegung der v. Waltenhofen'schen Bestimmung, 1 Daniell = 1,088 Volt, auf letzteres Maass umgerechnet sind:

*) Wien. Akad. Ber. IL, S. 229.

Daniell, gewöhnliche Form mit Thonzelle, Amalgamirtes Zink in Mischung von 1 Vol. Schwefelsäure mit 15 Vol. Wasser, Kupfer in concentr. Kupfervitriollösung . . .	1,088	v. Waltenhofen.
„ Normalelement Kittler's ohne Thonzelle, Amalg. chem. reines Zink in Schwefelsäure von 1,075 specif. Gew., Chem. reines Kupfer in Kupfersulfatlösung von 1,19 specif. Gew.	1,195	Kittler.
„ Das amalg. Zink in Zinksulfatlösung	1,059	„
Nicht amalg. Zink in $55\frac{1}{2}$ proc. Sulfatlösung, Kupfer in 16,5 proc. Kupfersulfatlösung bei 20°	1,072	Fleeming.
„ Gewöhnliche Form	1,14 — 1,10	Kittler.
Latimer Clark	1,457	Clark.
„	1,433	v. Ettingshausen, Lord Rayleigh.
Grove, Platin in käuflicher Salpetersäure .	1,79 — 1,82	v. Waltenhofen.
„ Platin in Mischung von 1 Thl. käufl. Salpetersäure mit 2 Thln. Vitriolöl*)	1,86 — 2,01	„
Bunsen, Gaskohle in käufl. Salpetersäure .	1,80 — 1,87	„
„ Gaskohle in obiger Mischung	1,89 — 1,97	„
„ Gaskohle und amalgam. Zink in Chromsäuremischung im Anfang	2,0	J. Müller.
sinkt nach ungefähr einer Stunde Kurzschluss auf .	1,0	J. Müller.
Leclanché	1,48 — 1,51	Leclanché.
„ Nach längerem Gebrauche	1,28	v. Beetz.

Ueber eine grosse Anzahl von Messungen elektromotorischer Kräfte der verschiedenartigsten Combinationen und nach verschiedenen Methoden giebt Wiedemann's Lehrb. v. d. Elektr. I, S. 658 Aufschluss.

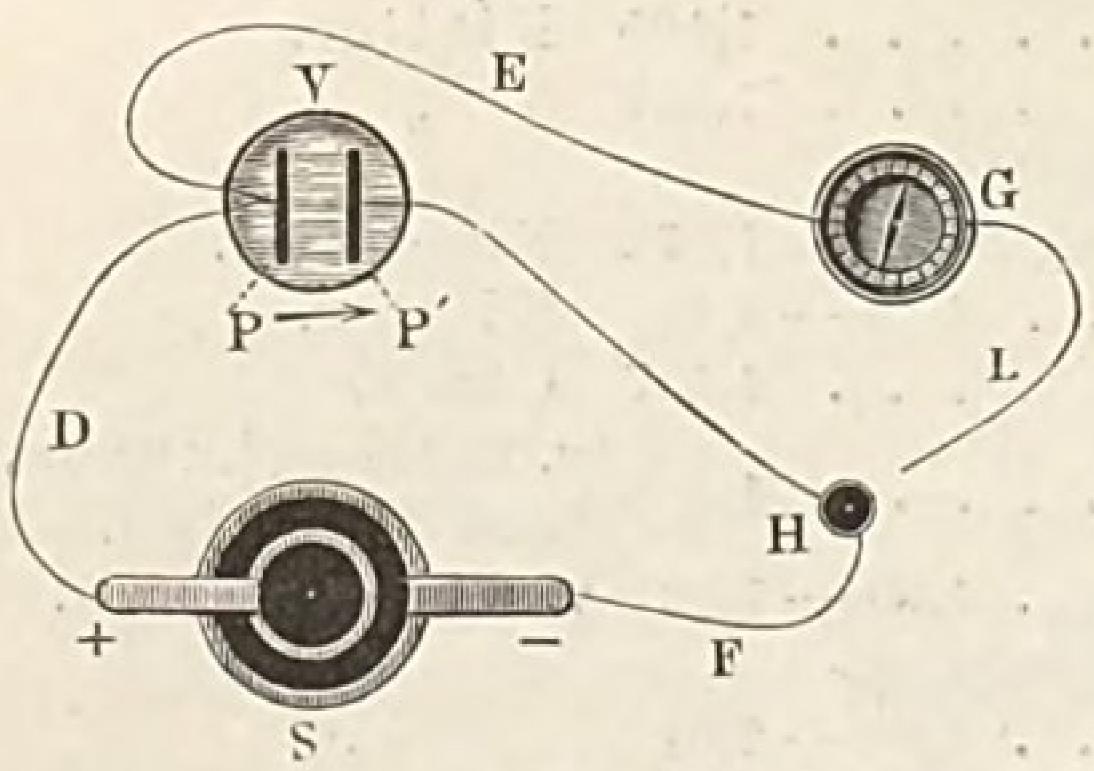
Galvanische Polarisation. Man versteht unter galvanischer 142
Polarisation jene Veränderung der Oberfläche von Leitern, durch welche letztere man einen Strom in eine Flüssigkeit hinein- beziehungsweise herausgeführt hat, vermöge welcher zwischen diesen Leitern und der Flüssigkeit eine der Stromrichtung entgegengesetzte elektromotorische Kraft hervorgebracht wird. Taucht man also zwei gleiche Leiter in eine leitende Flüssigkeit und sendet einen Strom hindurch, so geben dieselben nachher selbst ein wirksames Element, welches auf eine Zeitlang einen entgegengesetzten Strom liefert, sobald man die beiden Leiter durch einen Draht verbindet. Man nennt ein solches Element ein secundäres Element und dessen Strom Polarisationsstrom oder secundären Strom.

Um einen diesbezüglichen Versuch anzustellen, verbindet man die eine Platinplatte P des Voltameters V, Fig. 415 (a. f. S.), durch einen Draht D mit dem positiven Pol des Zinkkohlenbechers S und zugleich durch den

*) Diese Mischung, bei welcher das Vitriolöl eine entwässernde Rolle spielt, wurde von A. v. Waltenhofen als besonders wirksam empfohlen.

Draht E mit dem einen Ende der Drahtwindungen eines Galvanometers G. Vom anderen Pol der Säule führt ein Draht F zum Quecksilbernäpfchen H, in welches zugleich ein von der Platinplatte P' des Voltameters kommender Draht eintaucht. Ist die Verbindung in dieser Weise hergestellt, so geht durch das Voltameter ein Strom in der Richtung des kleinen Pfeils. Nachdem der Strom nur kurze Zeit gedauert hat, wird der Draht F aus dem Quecksilbernäpfchen herausgenommen (also der Strom unterbrochen), dagegen der von G kommende Draht L in H eingetaucht und dadurch das Galvanometer in den Schliessungsbogen des Voltameters gebracht. Es erfolgt alsbald eine Ablenkung der Galvanometernadel in einer solchen Richtung, dass sie einen von P' nach P gehenden Strom andeutet, einen Strom also, welcher demjenigen entgegengesetzt ist, welchen vorher der galvanische Becher S durch das Voltameter hindurchgesendet hat.

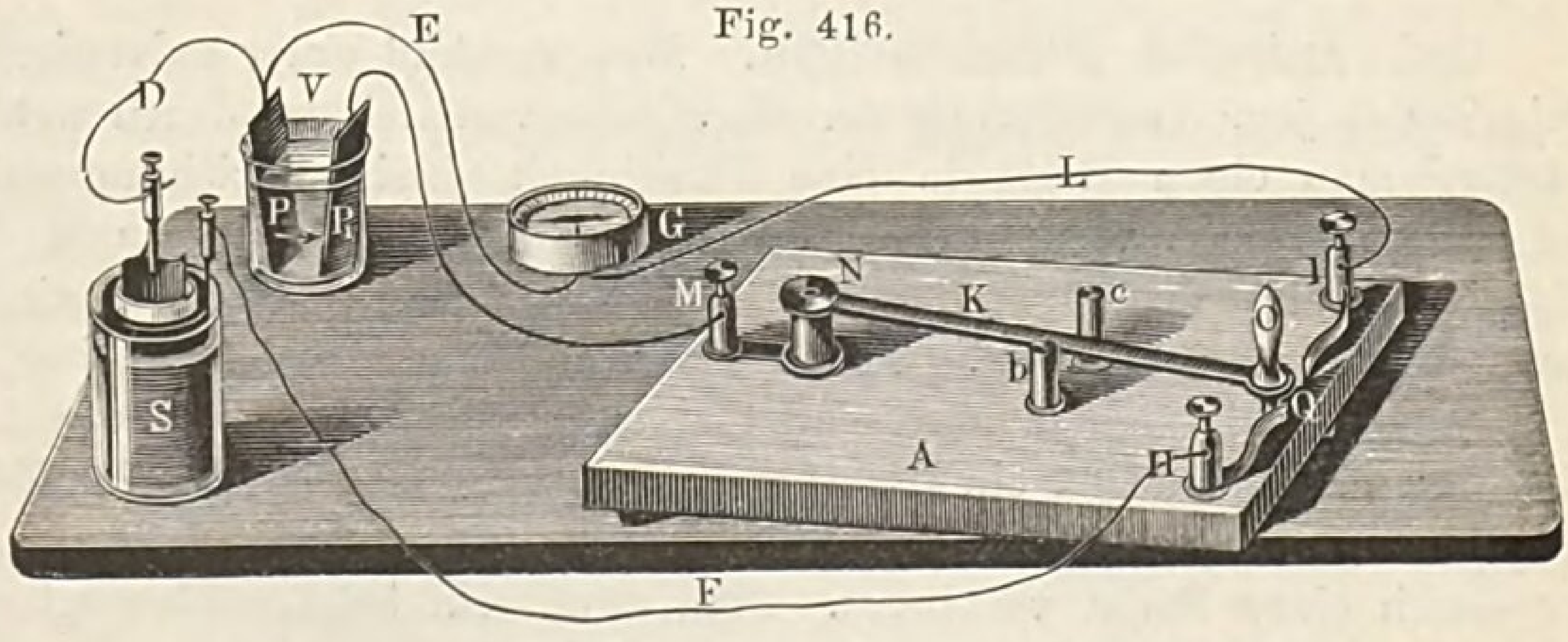
Fig. 415.



Die Ursache dieser durch den Strom selbst hervorgerufenen elektromotorischen Gegenkraft wird, wie schon oben bemerkt, mit dem Namen der galvanischen Polarisation bezeichnet.

Um abwechselnd das Voltameter in den Schliessungsbogen des Elektromotors und dann wieder das Galvanometer in den Schliessungsbogen des Voltameters zu bringen, kann man sich statt des Quecksilbernäpfchens

Fig. 416.



auch des in Fig. 416 dargestellten Apparates bedienen, welcher wohl ohne nähere Beschreibung verständlich sein wird. Wenn der Metallhebel K so steht, wie es die Figur zeigt, dass der an seinem Ende befestigte Metallstift O gegen die Metallfeder drückt, welche an dem Messingsäulchen H befestigt ist, so geht der Strom des Elektromotors durch das Voltameter V. Wird aber der Hebel K so weit zurückgedreht, dass der Metallstift O mit der Feder in Berührung kommt, welche in

dem Messingsäulchen *I* befestigt ist, so ist der Strom des elektromotorischen Bechers *S* ununterbrochen und das Galvanometer *G* ist in den Schliessungsbogen des Voltameters gebracht.

Durch die galvanische Polarisation erklärt es sich nun auch leicht, warum nur eine fast unmerkliche Wasserzersetzung stattfindet, wenn man ein Voltameter in den Schliessungsbogen eines einzelnen Volta'schen Elementes einschaltet.

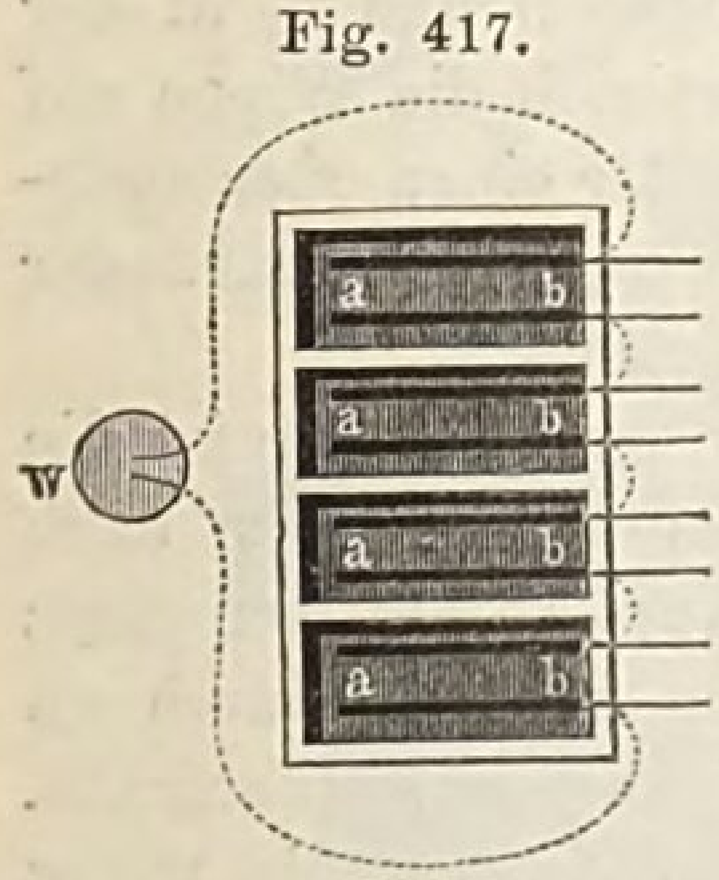
Die galvanische Polarisation erklärt uns ferner auch die Wirkung der von Ritter entdeckten Ladungssäule.

Wenn man eine Säule von Kupferscheiben und angefeuchtetem Papier aufbaut und die beiden Enden derselben mit den Polen einer Volta'schen Säule von hinlänglicher Spannung verbindet, so wird die secundäre Säule ganz in derselben Weise geladen, wie in dem eben betrachteten Falle die Platten des Voltameters. Wir haben hier ja nur eine ganze Reihe solcher Zersetzungszellen, deren Platten sämmtlich polarisirt werden. Trennt man die secundäre Säule (auch so wird die Ladungssäule genannt) von der galvanischen Kette, welche zu ihrer Ladung diente, so ist sie nun selbst im Stande, die Erscheinungen einer Volta'schen Säule hervorzubringen; sie zeigt an dem einen Pole positive, am anderen negative Elektricität, und ihr Strom, welcher dem der ladenden Säule entgegengesetzt ist, kann vorübergehend selbst chemische Wirkungen hervorbringen.

Poggendorff hat gezeigt, wie man eine secundäre Säule mit einer einfachen Kette, etwa einem Grove'schen oder Bunsen'schen Becher, laden und durch die Entladung der Säule einen Strom hervorbringen kann, der ungleich stärkere Widerstände überwinden kann, als das zur Ladung angewandte Plattenpaar.

Fig. 417 stellt eine secundäre Säule dar, die aus vier Paaren von Platinplatten besteht; jedes Paar befindet sich in einem besonderen Troge.

Fig. 417.



Wird nun die vordere Platte einer jeden Zelle mit dem einen, die gegenüberstehende mit dem anderen Pole des ladenden Bechers verbunden, so wird jedes Paar von Platinplatten geladen, und zwar ist die Ladung für alle Paare dieselbe. Hat man dann die Verbindung mit dem Rheomotor aufgehoben, die Platinplatten nach dem Principe der Säule so verbunden, wie es durch die punktirten Linien angedeutet ist, und dann die secundäre Säule durch einen Bogen geschlossen, in welchen ein Voltameter *w* eingeschaltet ist, so entsteht ein Strom, welcher eine kräftige Wasserzersetzung bewirkt, wenn auch das ladende Element eine solche Zersetzung nicht hervorbringt.

Der Entladungsstrom der secundären Säule ist natürlich nur ein vorübergehender. Um eine merkliche Quantität Wasser zu zersetzen, muss man rasch nach jeder Entladung die Platinplatten wieder in ent-

sprechender Weise mit den Polen des primären Rheomotors verbinden, um alsbald eine neue Entladung bewerkstelligen zu können. Poggendorff hat einen sehr sinnreichen Apparat erfunden, den er die Wippe nennt, mit Hülfe dessen die Ladungen und Entladungen sehr rasch ausgeführt werden können.

Neben den Zellen *BB*, welche die Platinplatten aufnehmen, und welche man Fig. 418 im Grundriss sieht, ist ein Brett *AA* angebracht, welches die Unterlage zur eigentlichen Wippe bildet. Es ist von hartem, dichtem Holz gemacht, $2^1/_2$ cm dick, 10 cm breit und, falls das Instrument zur Ladung einer Batterie von vier Plattenpaaren dienen soll, ungefähr 15 cm lang.

In dieses Brett sind bis zur Tiefe von ungefähr 12 mm zwei Löcherreihen *ho* und *h'o'* eingebohrt, welche paarweise durch Kupferdrähte, die an beiden Enden hakenförmig herabgebogen, oder auch durch Eisenstäbe, die in das Brett eingelassen sind, verbunden werden, wie es in unseren Figuren gezeigt ist. Die Löcher werden mit Quecksilber gefüllt.

Von der Platinplatte 1 geht ein Kupferdraht nach *o'*, die Platte 1 ist also mit dem vordersten *o'* und *o* in leitender Verbindung; ebenso die Platte 2 mit den beiden folgenden Quecksilbernäpfchen *h'* und *h* etc.

Damit die Verbindungsdrähte möglichst kurz seien, hat man die Unterlage *AA* durch ein Stativ oder durch Holzklötze in gleiche Höhe mit dem oberen Theil der Platinplatten und diesen recht nahe zu bringen.

Auf die Unterlage kommt die eigentliche Wippe zu stehen, welche in etwas grösserem Maassstabe als in Fig 418, in Fig. 419 im Verticaldurchschnitt, und mit der Unterlage in Fig. 420 perspectivisch dargestellt ist.

Durch die Mitten der schmalen Seiten eines Brettes von 1 cm Dicke, 4 cm Breite und fast gleicher Länge mit der Unterlage gehen zwei stumpf zugespitzte Stifte s und s_1, welchen zwei Vertiefungen n und n_1 in der Unterlage entsprechen. Mittelst dieser Stifte stützt sich die Wippe auf die Unterlage in der Weise, dass sie entweder nach der einen oder anderen Seite neigt, so dass die an dem Brette befindlichen Haken entweder in die Quecksilbernäpfchen rechts oder links eintauchen.

Diese Haken sind von Kupferdraht. Auf der rechten Seite ist die Hälfte aller Haken, nämlich die mit *b* bezeichneten, an einem nach hinten verlängerten und dort mit *Z* bezeichneten Kupferdraht befestigt; die mit *a* bezeichneten Haken aber gehen durch das Brett hindurch zu einem nach vorn verlängerten und mit *P* bezeichneten Kupferdraht. Ist nun die Wippe auf die rechte Seite geneigt, so tauchen die mit *a* bezeichneten Haken in die mit *o* bezeichneten Löcher, während die mit *b* bezeichneten Haken in die mit *h* bezeichneten Löcher eintauchen.

Bei *Z* ist nun ein Verbindungsdraht angeschraubt, welcher zum Zinkcylinder, bei *P* ein solcher, welcher zum Kohlencylinder (oder zur Platinplatte) des ladenden Rheomotors geht; wenn also die Weipp nach

der rechten Seite geneigt ist, so sind dadurch die Platinplatten O_1, O_2, O_3 . . . mit dem Kohlen-, die Platinplatten H_1, H_2, H_3 . . . mit dem Zinkcylinder in Verbindung; die mit O bezeichneten werden also nega-

Fig. 418.

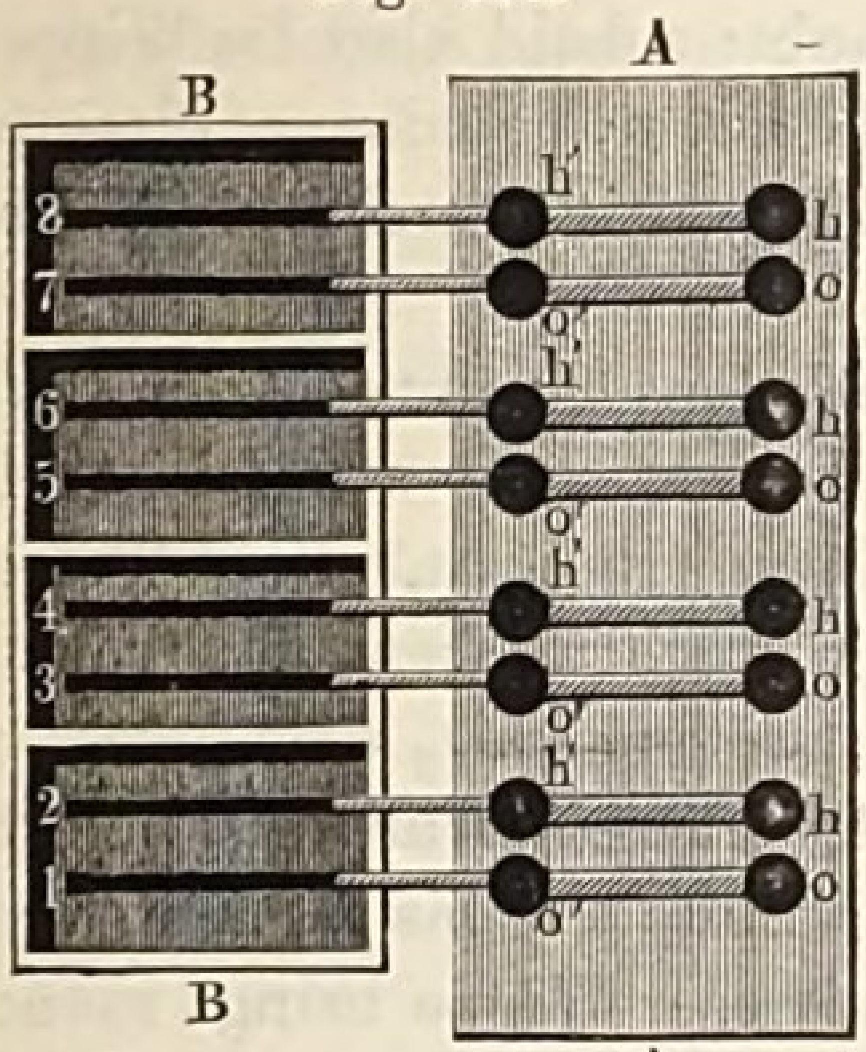
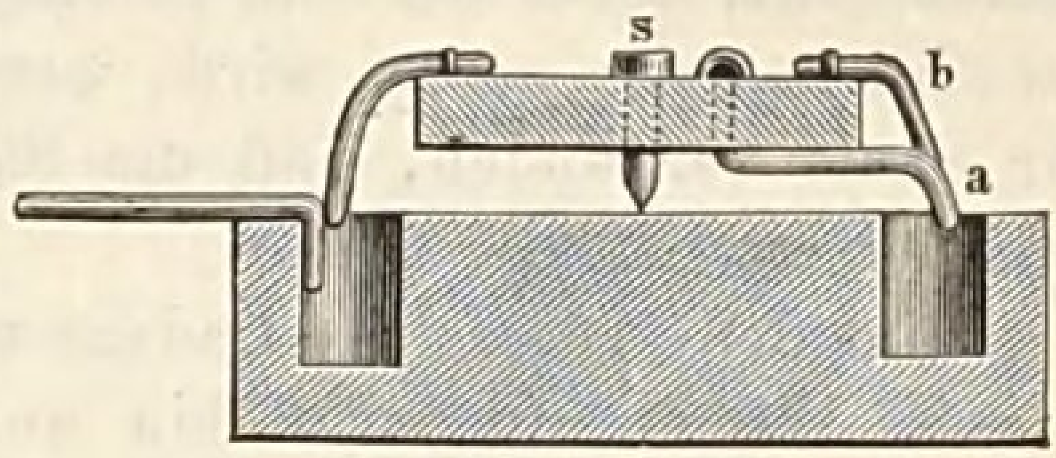


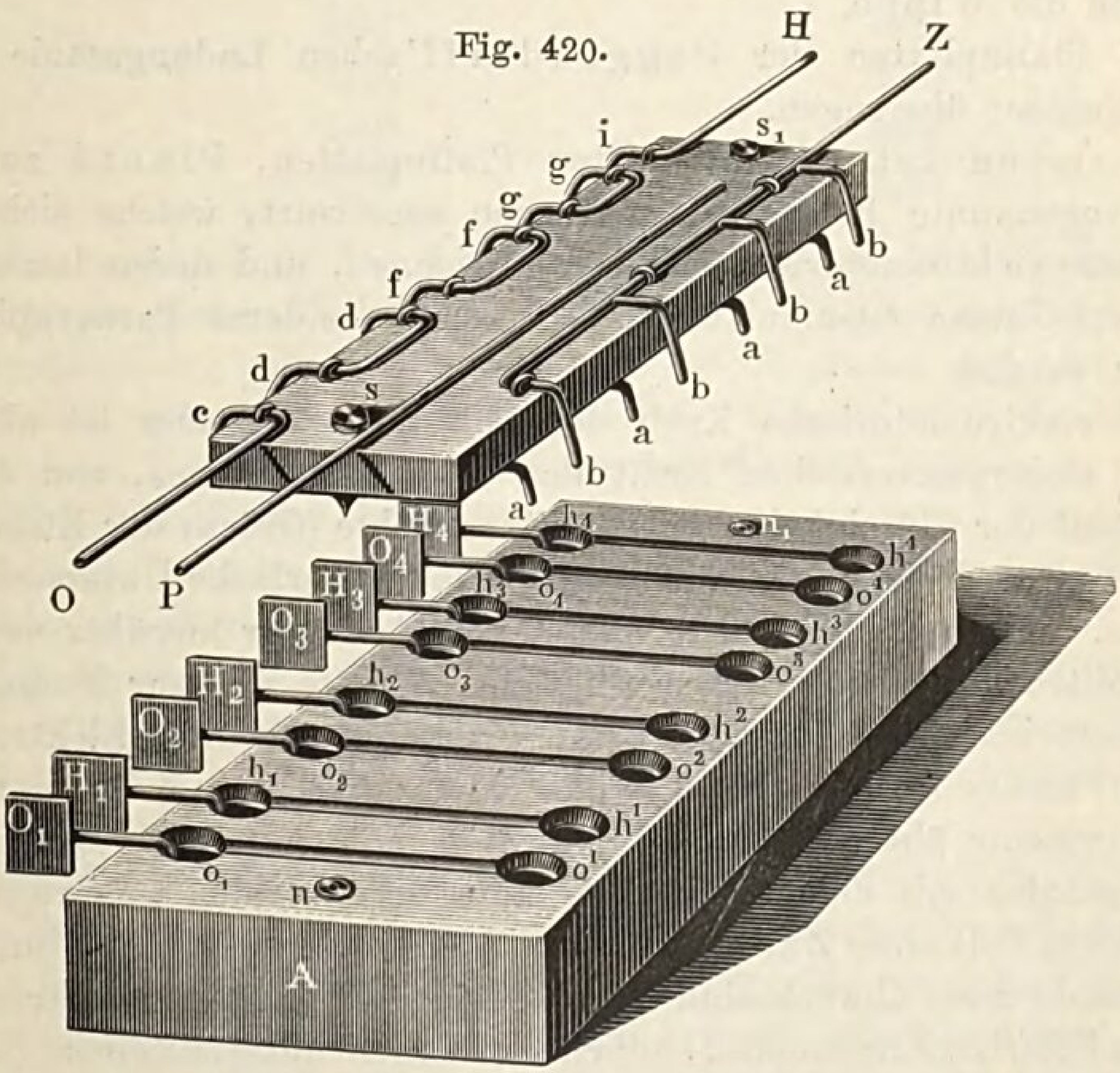
Fig. 419.



tiv, die anderen werden positiv polarisirt. (In Fig. 420 sind die fraglichen Platinplatten nur schematisch angedeutet.)

Auf der linken Seite der Wippe befindet sich nun ein anderes Hakensystem. Der vorderste c ist nach vorn (nach O) gebogen, der hintere i nach hinten (nach H). Die beiden mit d bezeichneten Haken sind

Fig. 420.



aus einem Stück Kupferdraht gemacht, ebenso die beiden mit f und die beiden mit g bezeichneten Haken. Wird nun die Wippe nach der linken Seite geneigt, so treten die Haken a und b aus dem Quecksilber ihrer Näpfchen heraus, die Haken c, d, f, g und i aber tauchen in die

Näpfchens links ein. Durch die Haken *d* werden die Platten 2 und 3 der Fig. 418 (die Platten H_1 und O_2, Fig. 420), durch *f* 4 und 5, durch *g* 6 und 7 in leitende Verbindung gebracht, also die Platinplatten nach dem System der Säule combinirt. Bei *H* nun ist der eine Enddraht des Voltameters, bei *O* der andere eingeschraubt; sobald also die Wippe nach der linken Seite gelegt wird, werden die zuvor geladenen Platinplatten zur Säule verbunden, und die Säule gleichzeitig durch das Voltameter geschlossen.

Um den Process des Ladens und Entladens zu unterhalten, hat man nur die Wippe andauernd hin und her zu bewegen, was leicht 100 mal in der Minute ausgeführt werden kann. Man erhält auf diese Weise zwar einen intermittirenden, aber doch beliebig lange währenden Strom.

Eine Batterie von 4 Plattenpaaren, welche $15^1/_2$ qcm gross waren und mit einem Grove'schen Element geladen wurden, lieferte bei 80 Ladungen und Entladungen in der Minute 80 bis 90 ccm Knallgas.

Die Anwendung des Quecksilbers in dieser Wippe bringt mancherlei Unannehmlichkeiten mit sich; J. Müller hat in seinem „Bericht über die neuesten Fortschritte der Physik" Seite 355 einen Apparat beschrieben, durch welchen ohne Quecksilber derselbe Effect hervorgebracht wird wie durch die Wippe.

Die Platinplatten der Poggendorff'schen Ladungssäule waren mit Platinmoor überzogen.

Thomsen hat aus platinirten Platinplatten, Planté aus Bleiplatten sogenannte Polarisationsbatterien construirt, welche sich durch sehr grosse elektromotorische Kraft auszeichnen, und deren letztere wir unter dem Namen Accumulatoren in einem besonderen Paragraphen besprechen werden.

Die elektromotorische Kraft des Polarisationsstromes ist abhängig von der elektromotorischen Kraft des primären Stromes, von der Beschaffenheit der Flüssigkeit, von der Stromdichte (Grösse der Elektrodenplatten) und noch einigen Umständen, worüber mehrfache Untersuchungen vorliegen. Wir folgen hier den zuletzt von F. Exner hierüber veröffentlichten Mittheilungen*). Dieser Physiker bediente sich zur Messung der elektromotorischen Kräfte eines Branly'schen Quadranten-Elektrometers von Bourbouze in Paris, welches im Princip mit dem in §. 71 beschriebenen Instrumente übereinstimmt. Je zwei gegenüberstehende Quadrantenplatten wurden mit dem einen Pole, die anderen beiden Quadranten mit dem anderen Pole einer Zamboni'schen Säule verbunden. Die Aluminiumplatte wurde dann abwechselnd durch einen Pol der primären Stromkette, dann des Polarisationsstromes, endlich zur Vergleichung mit einem Pol einer Daniell'schen Kette geladen, während jedesmal der andere Pol zur Erde abgeleitet war. Die mit Fernrohr und Scala abgelesenen Ausschläge waren direct proportional den elektromotorischen Kräften und wurden auf jene

*) Wien. Akad. Ber. 1878.

von einem Daniell als Eins reducirt. Als primäre Stromquelle wurde eine Noë'sche Thermosäule angewandt, welche wir später beschreiben werden. Als destillirtes, ausgekochtes und durch Auspumpen luftfrei gemachtes Wasser zwischen Wollaston'schen Spitzen aus feinstem Platindrahte untersucht wurde, ergaben sich folgende zusammengehörige Werthe:

Elektromotorische Kraft (Daniell = 1) des primären Stromes	der Polarisation
0,03	0,03
0,20	0,20
0,37	0,36
0,43	0,43
0,60	0,60
0,90	0,91
1,03	1,03
1,28	1,28
1,54	1,53
1,94	1,90
2,11	2,00
2,31	2,03
2,54	2,03
3,09	2,03
4,03	2,03

Man sieht, dass die elektromotorische Kraft der Polarisation anfangs genau gleich bleibt den ansteigenden Werthen der elektromotorischen Kraft des primären Stromes, bis das Maximum von 2,03 Daniell erreicht ist, welches dann constant bleibt. Dies ist zugleich der Punkt, bei welchem die sichtbare Zersetzung des Wassers beginnt.

Wird das Wasser mit Schwefelsäure angesäuert, so bleibt der Verlauf derselbe, nur liegt der Maximalwerth der elektromotorischen Kraft der Polarisation viel tiefer (bei 1,60 Daniell).

Bei Anwendung grosser Stromstärken wird durch Bildung von Wasserstoffhyperoxyd eine Aenderung herbeigeführt, indem dann der Werth des Maximums bei verschiedenen Versuchsbedingungen verschieden hoch ausfällt.

Die Vergrösserung der Platinelektroden ändert den Verlauf der Erscheinung nicht wesentlich, vorausgesetzt, dass das Wasser vollständig gasfrei ist, widrigenfalls eine Störung eintritt, die wir später unter dem Namen der elektrolytischen Convection kennen lernen werden.

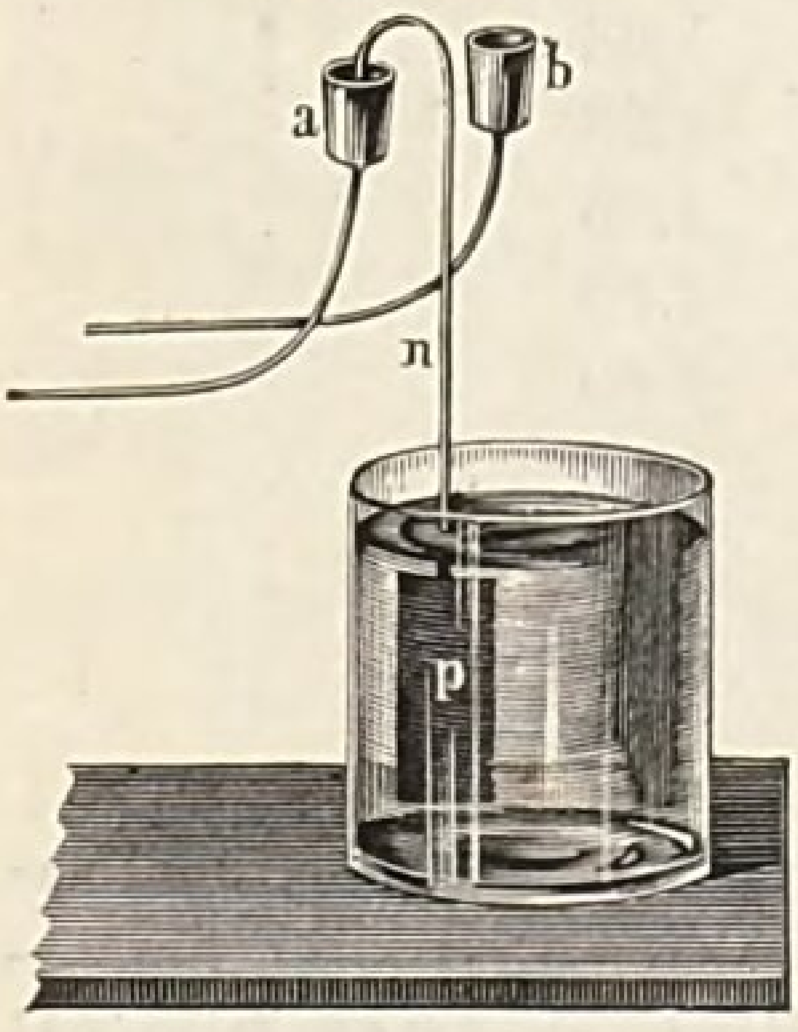
Ausserdem hängt die Grösse der Polarisation ganz besonders von der Beschaffenheit und dem Materiale der Polplatten ab, da von diesen die chemischen Processe abhängen, welche in der Zersetzungszelle vor sich gehen. Platten von Kupfer in Kupfervitriollösung z. B. geben fast gar keine Polarisation. Gänzlich unpolarisirbare Elektroden

werden nach Du Bois-Reymond nur erhalten aus amalgamirtem Zink in Lösung von Zinkvitriol oder Chlorzink. Es ist dies für physiologische Versuche von grosser Wichtigkeit.

Was nun die Ursache der galvanischen Polarisation betrifft, so schienen die Thatsachen darauf hinzudeuten, dass sie in einer Gasschicht zu suchen sei, mit welcher sich die Platten des Voltameters in Folge der Wasserzersetzung bekleiden. Die negative Polplatte überzieht sich nämlich mit Wasserstoff und wird dadurch elektropositiv gegen die andere, die sich in gleicher Weise mit Sauerstoff bekleidet.

Für die Richtigkeit dieser Erklärung scheint folgender Versuch Schönbein's zu sprechen. In ein Quecksilbernäpfchen *a*, Fig. 421, welches mit dem einen Drahtende eines nicht sehr empfindlichen Multiplicators in Verbindung steht, ist der Draht einer Platinplatte *p* eingetaucht, welche vorher wohl gereinigt sein muss, und die in ein Gefäss mit gesäuertem Wasser herabhängt. — Hängt man nun in das Näpfchen *b* den Draht einer zweiten, ganz gleichen Platinplatte, welche vorher ebenfalls gehörig gereinigt wurde, und die auch in die saure Flüssigkeit eintaucht, so bleibt die Multiplicatornadel ruhig, weil die beiden Platinplatten elektromotorisch gleich sind. Hat man aber die zweite Platinplatte, die wir mit *p'* bezeichnen wollen, vorher eine Zeit lang in eine Atmosphäre von Wasserstoff eingetaucht, so zeigt sie sich jetzt elektropositiv gegen die andere, die Multiplicatornadel wird in einer Richtung abgelenkt, welche zeigt, dass in der Flüssigkeit ein positiver Strom von *p'* nach *p* geht.

Fig. 421.



War die Platte *p'* in eine Atmosphäre von Chlor eingetaucht gewesen, so zeigt sie sich elektronegativ gegen *p*.

Hat die Platinplatte *p'* als negative Polplatte zur galvanischen Wasserzersetzung gedient, so verhält sie sich genau so, als ob sie in eine Flasche mit Wasserstoffgas eingetaucht gewesen wäre.

Wer nun aber die Contacttheorie nicht anerkennt, muss auch diese Polarisationstheorie aufgeben und versuchen, die beobachteten Thatsachen anderweitig zu erklären. Eine solche Erklärung ist von J. Bosscha und von F. Exner gegeben worden, indem sie die Polarisation auf die reciproken chemischen Processe zurückzuführen suchten, welche zwischen den durch den Strom abgeschiedenen Bestandtheilen vor sich gehen. Diese Bestandtheile suchen sich nämlich wieder zu vereinigen, wenn sie nicht durch andere chemische Processe daran verhindert werden.

Diese Erklärung wird indess von anderer Seite bestritten und wir gehen deshalb hier nicht weiter auf dieselbe ein. Hier sei nur noch auf den Zusammenhang zwischen der Polarisation und der Theorie der

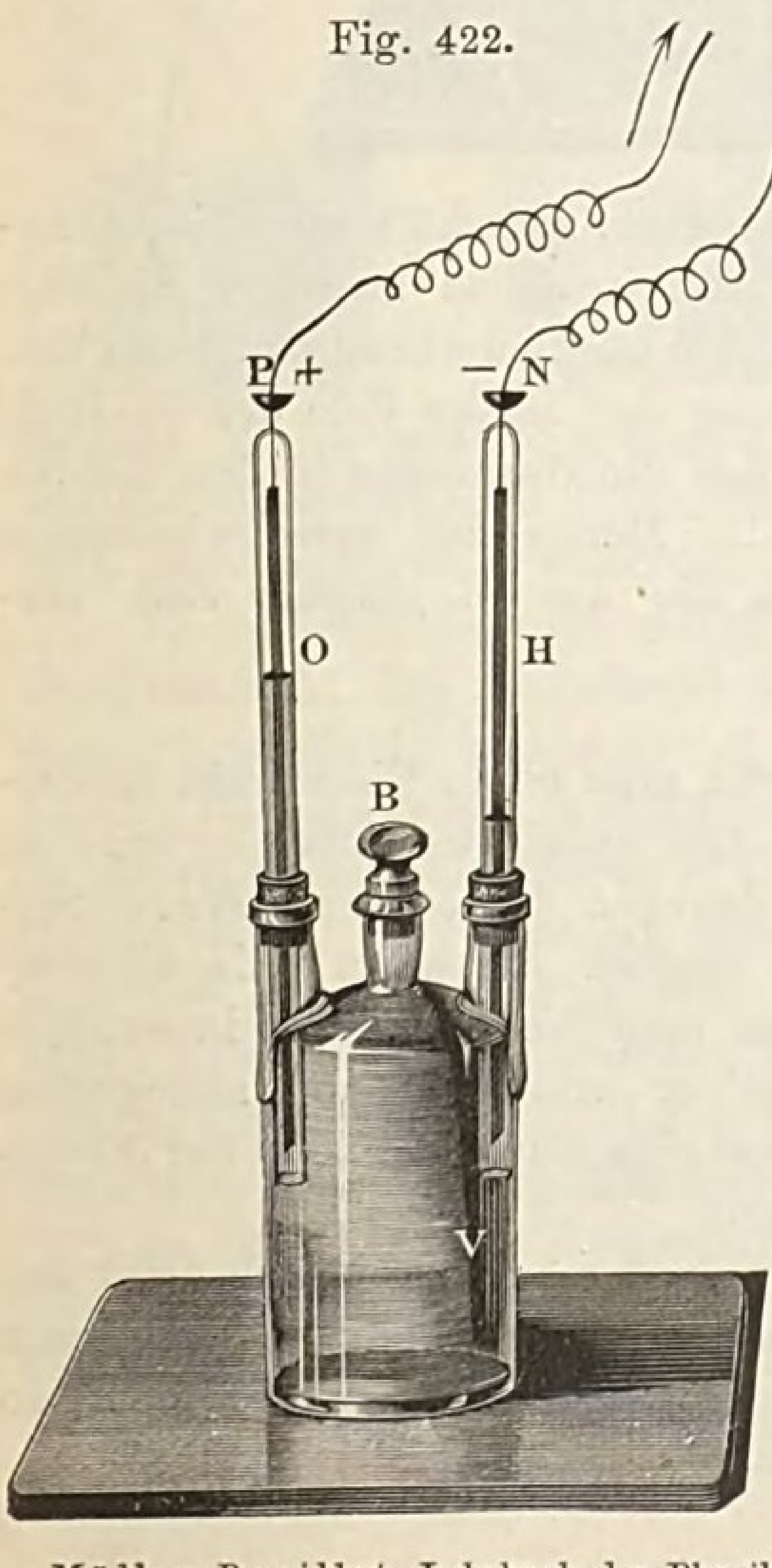
constanten Ketten hingewiesen. Man stellt sich denselben folgendermaassen vor:

Der galvanische Strom zersetzt nicht allein die Flüssigkeit im Voltameter, sondern es findet eine ähnliche Zersetzung in jedem Becher, in jeder Zelle des Rheomotors statt. Der Sauerstoff wandert zur positiven Platte, welche in den meisten Fällen Zink ist, und oxydirt dieselbe; hier findet also keine Gasablagerung statt, die zu einer galvanischen Polarisation Anlass geben könnte; der Wasserstoff lagert sich aber auf der negativen Polplatte ab und kann also eine merkliche Verminderung der ursprünglichen elektromotorischen Kraft bewirken, die sich dann mit der Stromstärke ändert.

Das Wesen der constanten Ketten bestände also darin, dass eine Wasserstoffablagerung an der negativen Polplatte verhindert wird. Bei der Bunsen'schen und Grove'schen Kette geschieht dies dadurch, dass die negative Polplatte in Salpetersäure steht, welche den ausgeschiedenen Wasserstoff sogleich bei seiner Entstehung wieder oxydirt.

Grove's Gasbatterie. Die in den beiden letzten Paragraphen besprochenen Thatsachen stehen im Zusammenhange mit der Wirkung der von Grove construirten Gasbatterie. Fig. 422 stellt ein einzelnes Element der Gassäule dar. Ein Glas *V*, welches mit drei Hälsen versehen ist, wird mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt und dann in die beiden seitlichen Hälse mittelst wohlschliessender Korke die Glasröhren *O* und *H* eingesteckt. Diese Glasröhren sind unten offen, oben geschlossen; in dem oberen Ende ist aber ein Platindraht eingeschmolzen, welcher oben ein Platinnäpfchen, unten aber ein fast bis zum unteren Ende der Röhre reichendes Streifchen von Platinblech trägt, welches mit Platinmoor überzogen ist. Sind die beiden Röhren eingesetzt, so werden sie zunächst mit verdünnter Schwefelsäure dadurch gefüllt, dass man den Hals bei *B* schliesst, und dann das ganze Gefäss umkehrt. Nachdem nun beide Röhren mit der Flüssigkeit gefüllt sind, lässt man in die eine 143

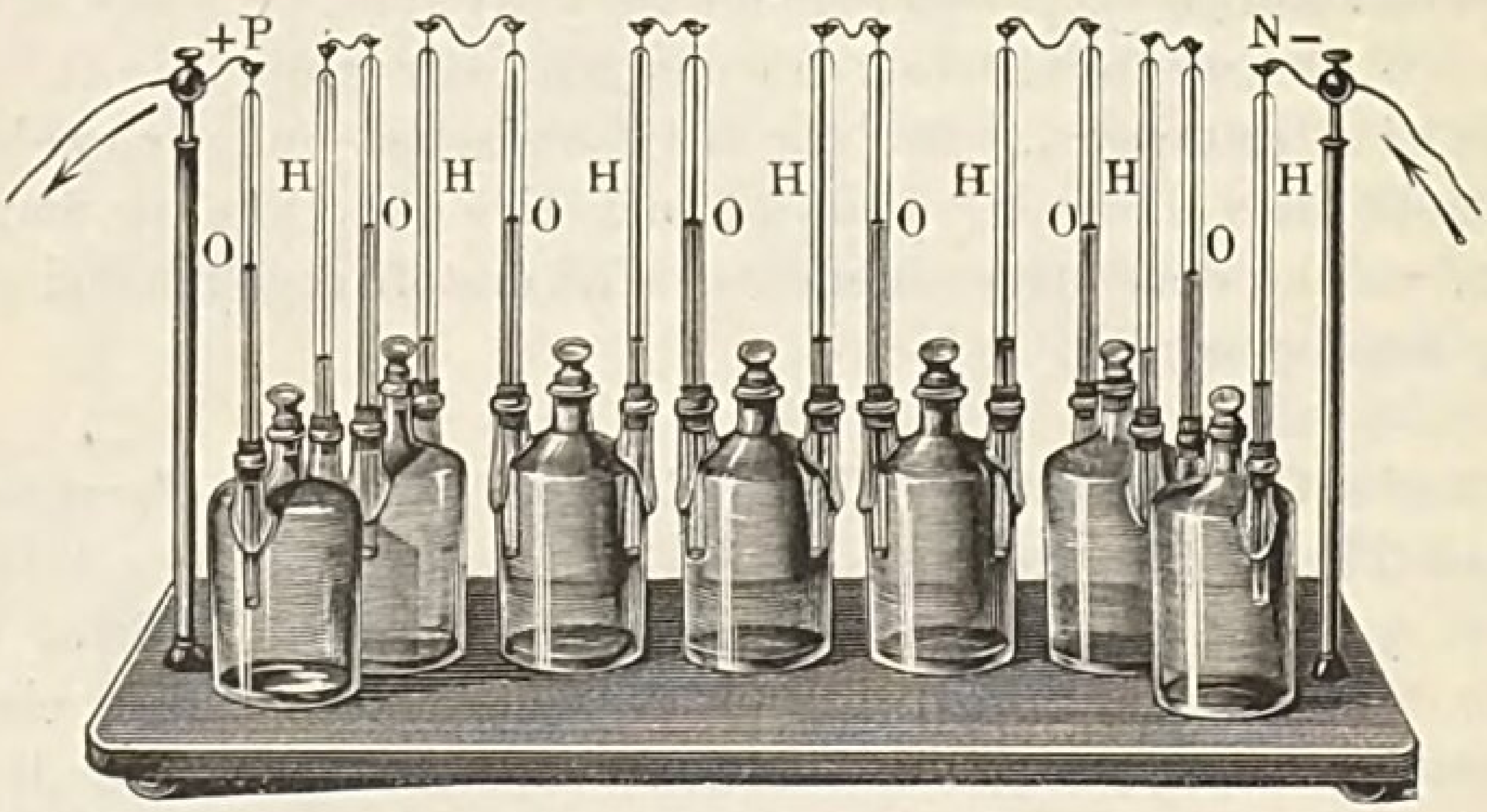
Fig. 422.



mittelst eines durch die Oeffnung bei *B* eingeführten Gasentbindungsrohres Sauerstoffgas, in die andere aber Wasserstoffgas aufsteigen, und dadurch wird der Apparat in ein galvanisch wirksames Plattenpaar verwandelt, und zwar so, dass das über dem Sauerstoff befindliche Quecksilbernäpfchen zum positiven, das andere zum negativen Pole wird, wie sich dies ohne Weiteres aus den beiden vorhergehenden Paragraphen ergiebt.

Wenn man mehrere solcher Gasbecher in der Weise zusammenstellt, wie es Fig. 423 zeigt, und das Quecksilbernäpfchen einer jeden Wasserstoffröhre mit dem Quecksilbernäpfchen der Sauerstoffröhre des

Fig. 423.



folgenden Gases in leitende Verbindung setzt, so erhält man eine Gassäule, deren Strom kräftig genug ist, um in einem zwischen die Pole derselben eingeschalteten Voltameter eine Wasserzersetzung zu bewirken.

Sobald durch die leitende Verbindung der beiden Pole der Gassäule der Strom hergestellt ist, sieht man, dass die Gasmenge in den Röhren fortwährend abnimmt, und zwar ist die Menge des verschwindenden Wasserstoffgases doppelt so gross, als die des in gleicher Zeit verschwundenen Sauerstoffgases.

144 **Passivität des Eisens.** Taucht man einen Eisendraht in verdünnte Salpetersäure von weniger als 1,35 specif. Gewicht, so wird er lebhaft angegriffen; taucht man ihn dagegen in concentrirte Salpetersäure, so erfolgt kein merklicher Angriff. Ja wenn er in die concentrirte Säure eingetaucht war, so kann man ihn nun selbst in weniger concentrirte Säure bringen, ohne dass er von derselben angegriffen wird. Durch das Eintauchen in concentrirte Säure ist also der Eisendraht gewissermaassen passiv geworden.

Die Behandlung mit concentrirter Salpetersäure ist jedoch nicht das einzige Mittel, wodurch man Eisen passiv machen kann. Wenn man einen Eisendraht in der Weingeistflamme bis zum Anlaufen erhitzt, so wird er dadurch gleichfalls passiv gemacht.

Taucht man in Salpetersäure von 1,35 specifischem Gewicht zuerst einen Platindraht *P*, Fig. 424, berührt man denselben mit einem wohl gereinigten Eisendraht, so wird derselbe nicht von der Säure angegriffen, wenn man ihn in die Flüssigkeit eintaucht, während er ausserhalb fortwährend mit dem Platindrahte in Berührung bleibt, obgleich derselbe Draht für sich allein lebhaft von der Säure angegriffen wird. Taucht man statt des Platindrahtes das geglühte und dadurch passiv gemachte Ende eines Eisendrahtes in die Flüssigkeit, so kann dieser vollkommen die Rolle des Platindrahtes im vorigen Versuch übernehmen.

Fig. 425 stellt eine Variation dieses Versuches dar. Das geglühte und dadurch passiv gemachte Ende eines Eisendrahtes werde in Salpetersäure von 1,35 specifischem Gewicht getaucht. — Es wird nicht angegriffen. Biegt man aber nun den Draht um, so wird auch das ungeglühte Ende *E* beim Eintauchen in die Flüssigkeit nicht angegriffen, während ein heftiger Angriff erfolgt, wenn man das ungeglühte Ende *E* in die Flüssigkeit eintaucht, ohne dass sich das geglühte Ende *P* schon darin befindet.

Fig. 424.

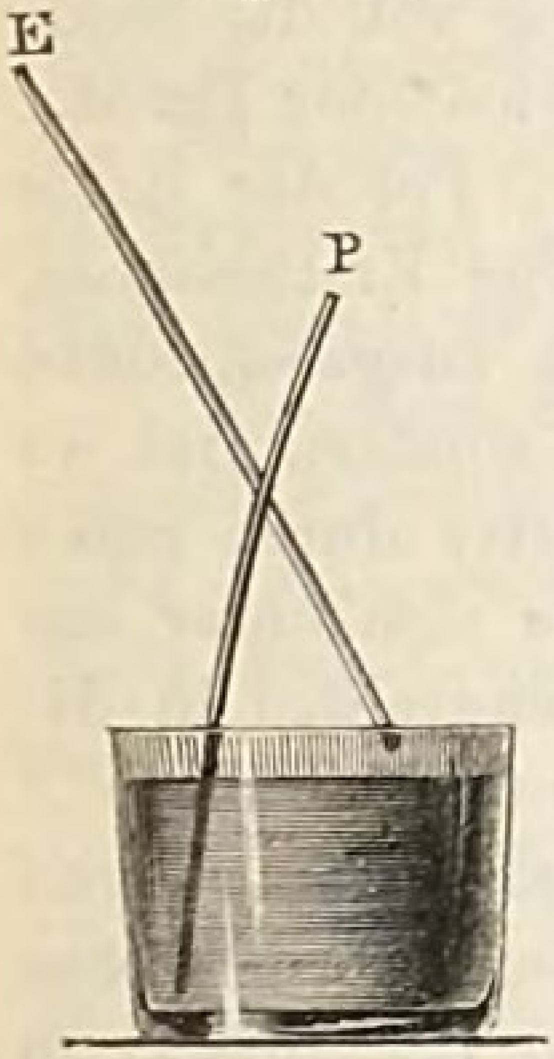
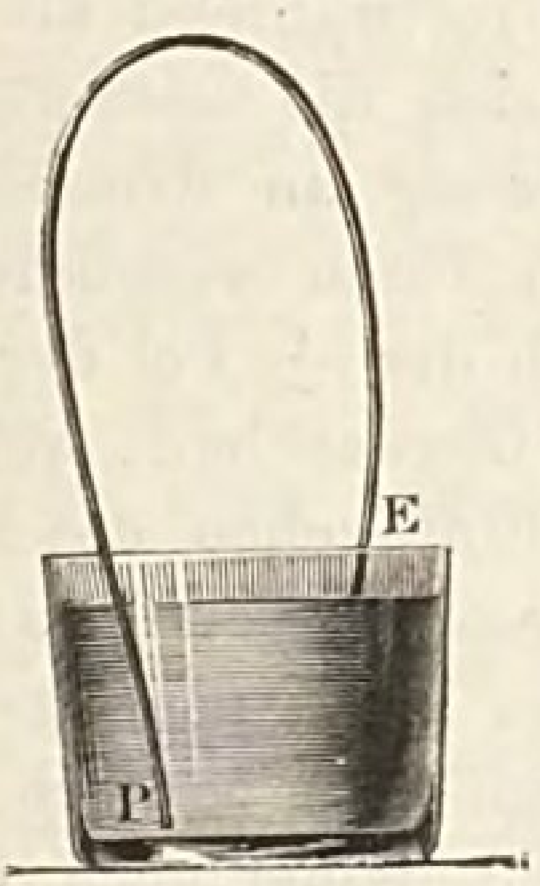


Fig. 425.



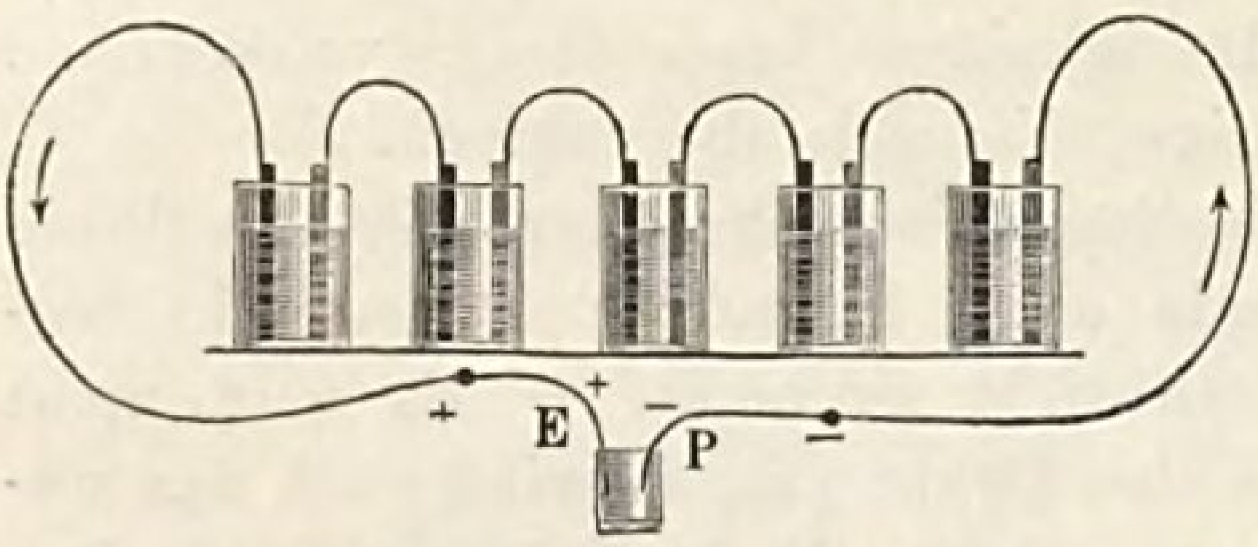
Hat man den Draht *E*, Fig. 424, in die Flüssigkeit eingeschoben, während er ausserhalb mit *P* in Berührung blieb, so kann man nun *P* ganz entfernen, ohne dass der Draht *E* seine Passivität verliert; ja man kann mit dem auf die erwähnte Weise passiv gemachten Drahte *E* die Passivität auf einen weiteren gewöhnlichen Eisendraht in derselben Weise übertragen, wie man sie von *P* auf *E* übertrug.

Es ist klar, dass die durch das Glühen des Eisendrahtes gebildete Oxydulschicht den Eisendraht vor dem Angriff der Säure schützt, und dadurch ist die Idee nahe gelegt, dass das passive Eisen selbst in solchen Fällen, wo eine solche Schicht nicht sichtbar wird, z. B. beim Eintauchen in concentrirte Salpetersäure, dennoch diese Eigenschaft einer dünnen Oxydulschicht zu verdanken hat. — Dann aber zeigt der Umstand, dass man den Platindraht, Fig. 424, mit einem geglühten Eisendraht vertauschen kann, dass das durch Glühen gebildete Eisenoxydul ganz wie Platin functionirt, dass durch eine solche Oxydulschicht das Eisen gewissermaassen eine negative galvanische Polarisation erleidet.

In dem Fig. 424 dargestellten Versuch bildet *E* offenbar den positiven Pol einer einfachen Kette; es liess sich also erwarten, dass man Eisen auch dadurch passiv machen kann, dass man es als + Pol einer Volta'schen Säule in eine Säure taucht, die es an und für sich angreifen würde.

Schönbein hat den Versuch wirklich angestellt*). An dem + Pol einer aus 15 Wollaston'schen Plattenpaaren bestehenden Säule (einige Becher einer constanten Batterie reichen zu diesem Versuche ebenfalls aus) war ein Eisendraht befestigt, während der negative Pol dieser Säule mit einem Platindraht endigte. Zunächst wurde der negative Platindraht in ein Gefäss mit Salpetersäure von 1,35 specifischem Gewicht eingetaucht und dann die Kette durch Eintauchen des mit dem + Pol der Säule verbundenen Eisendrahtes in dieselbe Säure geschlossen, wie Fig. 426 andeutet; es zeigte sich dieser Eisendraht vollkommen passiv, d. h. er wurde von der Säure in keiner Weise angegriffen und besass nach Abtrennung von der Säule dieselben Eigenschaften, wie ein durch Glühen passiv gemachter Draht.

Fig. 426.



Bleibt der passive Eisendraht fortwährend als + Pol der Kette in der Säure eingetaucht, so zeigt sich die merkwürdige Erscheinung, dass der in Folge der Wasserzersetzung an demselben ausgeschiedene Sauerstoff sich nicht etwa mit dem Eisen verbindet, sondern frei an demselben aufsteigt, gerade so, als ob der + Pol der Kette durch einen Platindraht gebildet würde. — Die Oxydschicht, welche sich unter den erwähnten Umständen gleich beim Eintauchen des Eisendrahtes in die Flüssigkeit bildet, schützt ihn vollkommen vor fernerer Oxydation.

Zum Gelingen dieses Versuches ist keineswegs Salpetersäure von 1,35 specif. Gewicht nöthig, man kann dieselbe noch über ihr 100 faches Volumen mit Wasser verdünnen und immer noch wird der zuletzt in die Flüssigkeit eingetauchte eiserne + Pol der Säule passiv werden, immer noch wird an demselben ausgeschiedener Sauerstoff frei als Gas aufsteigen.

Ganz ähnliche Erscheinungen finden statt, wenn anstatt verdünnter Salpetersäure verdünnte Schwefelsäure oder Phosphorsäure angewendet wird. Soll in dieser Säure der Sauerstoff am positiven Eisendraht sich frei entwickeln, so muss ebenfalls der negative Pol der Säule zuerst in die Flüssigkeit eintauchen, und dann erst der mit dem positiven Pol verbundene Eisendraht in dieselbe eingeführt werden.

Taucht man den positiven eisernen Poldraht vor dem negativen Poldraht in die verdünnte Säure, so wird er angegriffen; ebenso wenig wird der Eisendraht passiv, wenn man ihn abgetrennt vom positiven Pol der Säule in die verdünnte Säure taucht, mag der negative Pol bereits in dieselbe eingeführt sein oder nicht. Kurz, wenn das Eisen passiv werden soll, so darf es der chemischen Einwirkung der verdünnten Säure nicht vor der Stromwirkung ausgesetzt sein.

*) Pogg. Ann. Bd. XXXVII, S. 391

Wendet man statt der verdünnten Säure in diesem Versuche die wässerige Lösung einer Sauerstoffverbindung an, welche nicht merklich chemisch auf das Eisen einwirkt, wie Lösungen von Alkalien und vollkommen neutralen Salzen, so wird das Eisen immer passiv, wie man auch die Kette schliessen mag; bei Anwendung von Kalilauge z. B. oder von Salpeterlösung wird das mit dem positiven Pole verbundene Eisen stets passiv, man mag nun den negativen oder positiven Pol zuerst in die Flüssigkeit tauchen*).

Darauf gründet sich die Construction von Voltametern, welche durch Platten von Eisenblech gebildet sind, die in Kalilauge eintauchen. In einem solchen Voltameter entwickelt sich der Sauerstoff frei an der positiven Polplatte, ohne das Eisen anzugreifen.

Es kann wohl als gewiss betrachtet werden, dass die Erscheinungen der Passivität des Eisens durch eine Oxydul- oder Oxydschicht vermittelt werden, welche einerseits das Eisen vor dem Angriffe der Säure schützt, andererseits aber in ähnlicher Weise elektromotorisch wirkt, wie die Bleihyperoxydschicht, welche eine Bleiplatte bekleidet. Eine mit Bleihyperoxyd überzogene Bleiplatte verhält sich nämlich gegen eine reine Bleiplatte elektronegativ (Planté's Element).

Wie diese Schicht zusammengesetzt ist, unter welchen Bedingungen sie sich bildet, unter welchen sie sich auflöst, sind freilich Fragen, welche noch keineswegs für alle Fälle genügend beantwortet sind, doch liegt darin kein Grund, die oben angedeutete Basis der Erklärung zu verlassen.

Die Bildung der Oxydulschicht beim Glühen der Eisendrähte ist klar. — Damit sich eine ähnliche Schicht beim Eintauchen in eine Flüssigkeit bilden kann, ist es nöthig, dass dem Eisen die zur Bildung der Oxydschicht nothwendige Menge Sauerstoff zugeführt wird, bevor noch irgend eine andere chemische Einwirkung der Flüssigkeit auf das Eisen stattfinden kann.

Concentrirte Salpetersäure wirkt so stark oxydirend, dass das blosse Eintauchen eines Eisendrahtes in dieselbe genügt, um die passiv machende Schicht zu bilden.

In Flüssigkeiten, welche weniger sauerstoffreich sind, muss ein galvanischer Strom die Zuführung des Sauerstoffs an das Eisen unterstützen, wenn sich die Oxydhülle bilden soll, und zwar muss die den Strom erregende elektromotorische Kraft um so stärker sein, je weniger leicht ausscheidbaren Sauerstoff die Flüssigkeit enthält. In Salpetersäure von 1,35 specif. Gewicht genügt noch die Combination des Eisendrahtes mit Platin; bei verdünnter Schwefelsäure muss man schon eine Volta'sche Säule in Anwendung bringen.

Dass ein Eisendraht, welcher durch blosses Eintauchen in concentrirte oder durch Combination mit Platin in verdünnte Salpetersäure

*) Pogg. Ann. Bd. XXXVIII, S. 402.

passiv gemacht worden ist, seinen vollen Metallglanz zeigt, kann keinen Grund abgeben, das Vorhandensein einer dünnen Oxydschicht in diesem Falle in Zweifel zu ziehen, denn diese Schicht muss bei wachsender Dicke die Schattirungen der Newton'schen Farbenringe durchlaufen; so lange also die Schicht nur noch eine den Farben der ersten Ordnung entsprechende Dicke hat, kann sie dem Metallglanz des Drahtes höchstens eine schwache Nüancirung ins Bläuliche oder Gelbliche ertheilen.

In elektromotorischer Beziehung steht die das Eisen passiv machende Schicht dem Platin sehr nahe.

Da das passive Eisen so stark elektronegativ ist, so erklärt sich nun auch leicht, wie es kommt, dass man die Platinplatte der Grove'schen oder den Kohlencylinder der Bunsen'schen Säule durch Eisen ersetzen kann, wie wir in §. 116 gesehen haben, vorausgesetzt, dass es immer in sehr concentrirte Salpetersäure zu stehen kommt.

Auch andere Metalle, namentlich Wismuth, Kupfer und Zinn, zeigen ähnliche Passivitätserscheinungen, nur in weit weniger ausgezeichneter Weise.

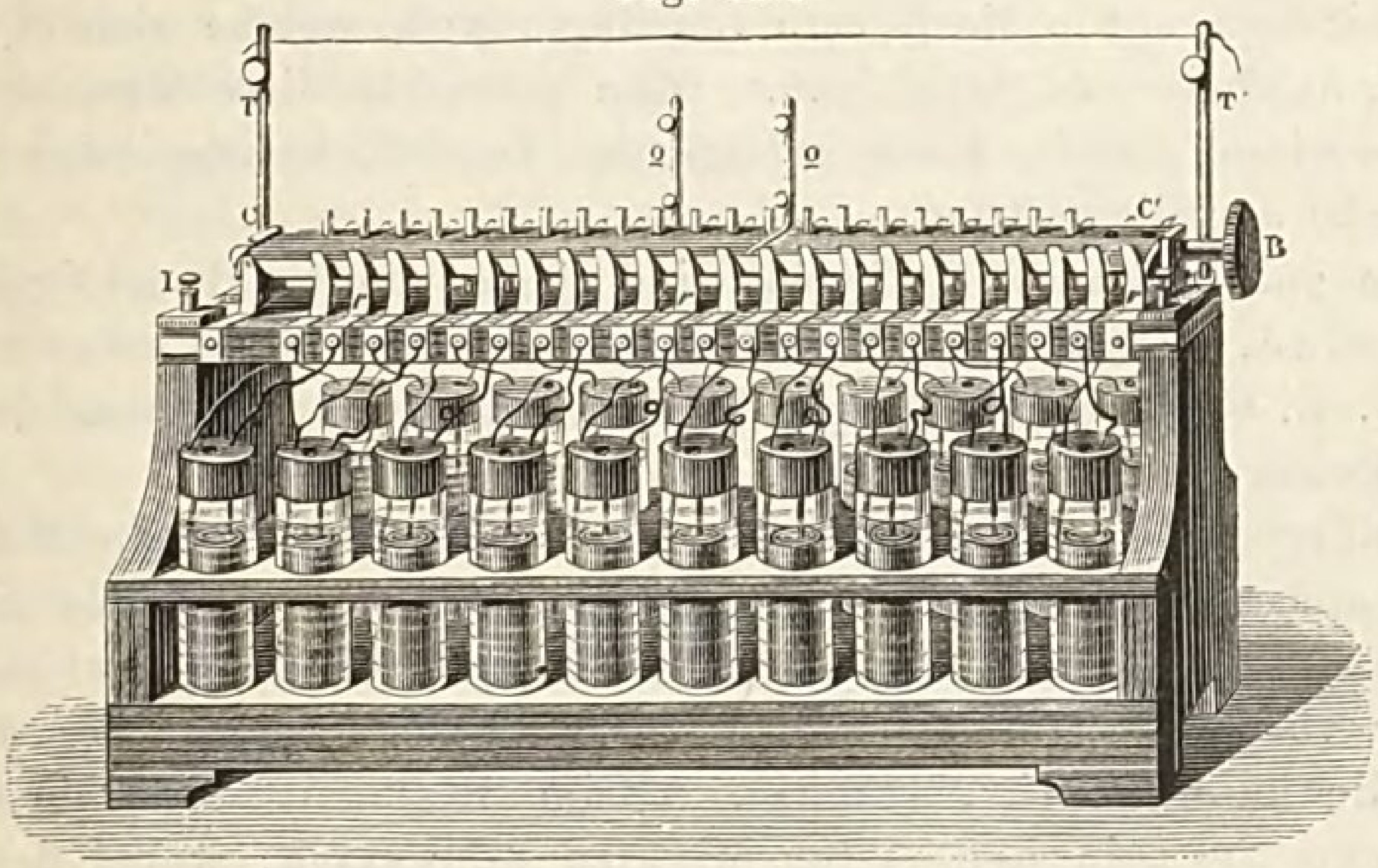
145 **Secundäre Elemente, Accumulatoren.** Ritter hat 1803 in Jena zuerst die Polarisation von Metallplatten zur Herstellung secundärer Elemente benutzt. Dem französischen Physiker Gaston Planté ist es in neuerer Zeit geglückt, durch Anwendung von Bleiplatten in verdünnter Schwefelsäure besonders wirksame secundäre Elemente zu construiren. Stellt man zwei Bleiplatten mit möglichst grosser Oberfläche einander nahe gegenüber in 10proc. Schwefelsäure und sendet einen Strom von mindestens zwei hinter einander verbundenen Bunsen-Elementen hindurch, so wird die Eintrittsplatte des Stromes durch den aus dem Wasser ausgeschiedenen Sauerstoff oberflächlich in Bleisuperoxyd verwandelt, während der Wasserstoff die Austrittsplatte bedeckt, eventuell, wenn sie oxydirt war, zu metallischem Blei reducirt. Unterbricht man nach kurzer Zeit den primären Strom, so bilden nunmehr die beiden Bleiplatten mit der Säure ein secundäres Element, und zwar bildet die mit Bleisuperoxyd überzogene Platte den positiven Pol. Der Strom geht jetzt von derselben Platte heraus, durch die er früher hineinging. Der secundäre Strom veranlasst aber jetzt eine Reduction des Bleisuperoxyds und eine Oxydation der anderen Platte, daher er bald an Intensität abnimmt und endlich ganz erlischt. Durch oft wiederholtes, abwechselnd entgegengesetztes Laden und Entladen wird die Bleioberfläche mehr aufgelockert und die Menge des Superoxyds vergrössert, was dann eine grössere Aufnahmefähigkeit des secundären Elementes und eine grössere Dauer seines secundären Stromes zur Folge hat. Man heisst dieses Herrichten des Elementes das Formiren desselben.

Die elektromotorische Kraft eines solchen formirten Planté-Elementes ist im geladenen Zustande = 2,25 Volt. Daraus erklärt sich,

dass ein Bunsen-Element dasselbe nicht vollständig zu laden vermag, da letzteres nur etwa 1,8 Volt elektromotorische Kraft hat, also seine Wirkung aufhört, sobald das Secundärelement bis zur selben Kraft geladen ist.

Indem Planté ferner eine grosse Anzahl solcher Elemente durch eine der Poggendorff'schen Wippe ähnliche Vorrichtung in rascher Wiederholung zuerst neben einander verband und in diesem Verbande lud, dann hinter einander schaltete, gelang es ihm, Secundärbatterien von sehr grosser Spannung zu erzielen*). Fig. 427 zeigt eine solche Batterie von 20 Planté'schen Elementen mitsammt dem Commutator CC'. Q und Q' sind die Ladungsklemmen, T T' die Entladungsklemmen. Die Batterie vertritt bei der Entladung eine solche von 30 grossen Bunsen-Elementen und bringt den langen Platindraht TT' in heftiges Glühen.

Fig. 427.



Um die Spannungserscheinungen noch weiter zu steigern, verband Planté die Pole der secundären Batterie mit einem Condensator aus vielen, nach Art der Franklin'schen Tafel belegten Glimmerplatten. Die letzteren wurden in analoger Weise, wie wir es im §. 80 beschrieben haben, zuerst zu einer Leydener Batterie gewöhnlicher Anordnung verbunden und dann zu einer Cascadenbatterie umgeschaltet. Es ist begreiflich, dass man an der letzteren ganz bedeutende Funkenentladungen erhalten kann, wie bei Versuchen mit der Influenzmaschine. Es wird also durch diese Vorrichtung die Elektricität des galvanischen Stromes in eine Form gebracht, wie sie gewöhnlich als statische Elektricität bezeichnet wird, und aus diesem Grunde nannte Planté seine Maschine eine rheostatische Maschine**).

*) Der Verfasser hatte durch die Gefälligkeit des Erfinders Gelegenheit, die ausserordentlichen Wirkungen einer aus 800 secundären Elementen zusammengesetzten Batterie, welche etwa 1200 Bunsen-Elementen entsprachen, zu sehen.

**) Gaston Planté, „Recherches sur l'Électricité", deutsch von Dr. J. G. Valentin.

Der französische Ingenieur Faure kam sodann auf den glücklichen Gedanken, die sogenannte Formirung der Bleielemente zu beschleunigen, und die Capacität derselben zu erhöhen, indem er die Bleiplatten von vornherein mit einer Schicht von Mennige (Minium), welches mit einem Klebmittel vermischt wurde, überkleidete*). Es bildet sich dann beim Hindurchleiten des Stromes an der Eintrittsplatte durch Oxydation eine grössere Menge von Bleisuperoxyd, an der Austrittsplatte eine sehr poröse Masse von metallischem Blei mit grosser wirksamer Oberfläche**).

Diese Elemente sind nun im Stande, eine viel grössere (nahezu dreimal so grosse) Menge von Elektricität aufzuspeichern, wie die ursprünglichen Planté-Elemente und werden daher Accumulatoren genannt.

Das Faure'sche Element ist seither mehrfach modificirt worden, ohne dass das Princip desselben verlassen worden wäre. Es handelte sich insbesondere darum, die Oberfläche zu vergrössern und das Gewicht zu vermindern, sowie die Kruste von Superoxyd, welche sich leicht losblättert, haltbarer zu befestigen. Man erreichte diese Zwecke bis zu einem gewissen Grade durch gitterartige Durchlöcherung oder geriefte Oberfläche der Bleiplatten.

Die gebräuchlichsten Typen sind jene von Sellon-Volkmar, O. Schulze, Farbaky & Schenek (Schemnitz), Reckenzaun, Julien, J. L. Huber (Hamburg), de Khotinsky, so wie jene der Electrical-Power-Storage-Company.

Während des Ladens, welches durch dynamoelektrische Maschinen erfolgt, steigt anfangs die elektromotorische Gegenkraft des Accumulators sehr rasch bis ungefähr 2,5 Volt, bleibt dann fast constant bis zur völligen Ladung, welche man an der starken Gasentwickelung, die dann eintritt, erkennt. Beim Entladen sinkt die elektromotorische Kraft in den ersten Minuten sehr rasch, wobei der Strom sehr stark ist, was von dem Verschwinden der Gaspolarisation herrührt. Dann bleibt die Spannung lange Zeit nahe constant auf etwa 2 Volt stehen und sinkt erst gegen Ende der Entladung ziemlich rasch. Der Widerstand der Accumulatoren sinkt bei der Ladung anfangs sehr rasch, bleibt dann lange constant bis zur völligen Ladung. Bei der Entladung behält er zunächst denselben Werth, um dann gegen Ende der Entladung proportional mit der Zeit wieder anzusteigen.

Bleibt der Accumulator geladen stehen, so verliert er allmälig an Energie, zeigt aber noch nach Wochen Reste von Ladung. Es ist zur Conservirung der Accumulatoren sehr nützlich, sie stets geladen auf-

*) Neuestens werden die negativen Platten mit einer Mischung aus gleichen Theilen Mennige und Bleiglätte, die positiven mit einer Mischung aus Blei und Mennige bedeckt.

**) In Wirklichkeit ist der chemische Process ein complicirter. Jedenfalls spielt die verdünnte Schwefelsäure hierbei nicht bloss die Rolle eines Leiters, sondern wird während des Entladens zum Theil gebunden, beim Laden wiederum frei.

zubewahren und von Zeit zu Zeit wieder zu laden. Die Güte eines Accumulators richtet sich ausser nach seiner Haltbarkeit insbesondere nach seinem Wirkungsgrade oder Nutzeffect, so wie auch nach seiner Capacität.

Man versteht unter dem Wirkungsgrade eines Accumulators das Verhältniss zwischen der elektrischen Arbeit, welche in demselben aufgespeichert wird, um ihn zu laden zu der elektrischen Arbeit, welche der Accumulator leistet, indem er sich bis zum Anfangszustande wieder entladet. Die elektrische Arbeit wird durch Multiplication der Stromstärke mit der elektromotorischen Kraft und der Zeit (Volt-Ampère-Stunden oder Watt-Stunden) erhalten *). Die Grenzzustände der Ladung und Entladung werden entweder durch die elektromotorische Kraft (Polspannung bei offenem Stromkreise), oder zweckmässiger durch Prüfung der Dichte der Schwefelsäure, am genauesten durch die Polspannung bei geschlossenem Stromkreise unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Stromstärke und des Widerstandes festgestellt. Wir entnehmen beispielsweise einer Untersuchung des Accumulators Farbaky & Schenek von A. v. Waltenhofen **) folgende Daten. Der vollständig geladene Accumulator wurde geschlossen und die Ampère-Stunden zu zählen begonnen, als die Säure eine Dichte = 1,184 zeigte. Von da an wurde durch 9 Stunden ein Strom von 20 bis 18 Amp. bei einer elektromotorischen Kraft von 1,99 bis 1,87 Volt entladen, worauf die Dichte der Säure auf 1,12 herabgesunken war. Man berechnet eine Entladung von $9 . 19 = 171$ Amp.-Stunden und von $9 . 19 . 1{,}93 = 330$ Watt-Stunden. Hierauf wurde der Accumulator wieder geladen, bis die Säure neuerdings 1,184 Dichte zeigte, wozu 190 Amp.-Stunden und 405 Watt-Stunden erforderlich waren. Der Wirkungsgrad betrug demnach in Procenten:

$$100 \frac{171}{190} = 90 \text{ Proc. Amp.-Stunden und}$$

$$100 \frac{330}{405} = 81{,}4 \text{ Proc. Watt-Stunden,}$$

was als ein sehr günstiges Ergebniss zu betrachten ist ***).

Unter der Capacität eines Accumulators versteht man die Menge von Elektricität, gemessen nach Ampère-Stunden, welche derselbe per 1 Kilogramm seines Gesammtgewichts abzugeben vermag. Diese Capacität konnte bis zu 15 Amp.-Stunden gesteigert werden, wenn man den Accumulator sich gänzlich entladen liess. Da dies aber in der Praxis nicht

*) 1 Watt-Stunde = 3600 Watt-Secunden = 3600 Voltamp.-Secunden (siehe hierüber §. 148).

**) Berichte und Bemerkungen über Accumulatoren etc., Centralblatt für Elektrotechnik (1888) S. 158.

***) Aehnliche Resultate lieferten die Accumulatoren von Reckenzaun & Julien, sowie nach W. Kohlrausch jener von J. L. Huber, Elektrotechn. Zeitschr. (1887) S. 229.

thunlich ist, weil zuletzt die Spannung zu sehr abnimmt, und überdies diese gänzliche Entladung dem Accumulator nachtheilig ist, so darf man in der Regel nur so weit entladen, bis die Spannung um 10 Proc. abgenommen hat, wobei höchstens 6 Amp.-Stunden per Kilogramm Gesammtgewicht entladen werden, was bei einer Entladungsspannung von 1,93 Volt 11,58 Watt-Stunden entspricht. Da 1 Watt-Stunde = 3600 Watt-Secunden $= \frac{3600}{9,8} = 367$ mkg Arbeit ist, so beträgt hiernach die in der Praxis anzunehmende Arbeitscapacität per Kilogramm Gesammtgewicht 4253 mkg, das erreichbare, aber praktisch nicht zulässige Maximum aber 10632 mkg. Ein geladener Accumulator könnte also, wenn wir von Arbeitsverlusten absehen, durch seine Entladung eine Höhe von über 10000 m erklimmen. Nach Hallwachs' Messungen konnte ein Accumulator von Schulze per Kilogramm Blei 3000 mkg aufspeichern *).

Bei Accumulatoren, welche als Motor von Fahrzeugen (Trambahn, elektrische Boote etc.) dienen, kommt natürlich die Capacität in erster Linie in Betracht, während bei der Anwendung stationärer Accumulatoren zur elektrischen Beleuchtung etc. vor Allem der Wirkungsgrad zu beachten ist **).

146 **Einfluss der Polarisation auf die Capillarconstante; Lippmann's Capillarelektrometer.** Bringt man in ein Schälchen einen Tropfen Quecksilber, bedeckt dasselbe mit verdünnter Schwefelsäure, in welcher ein wenig doppeltchromsaures Kali gelöst ist, und berührt den Rand des Quecksilbertropfens mit einem in die Säure eingetauchten blanken Eisendraht, so geräth der Tropfen in regelmässige Schwingungen, welche Stunden lang andauern können. Dieses von W. Kühne entdeckte Experiment ist nach G. Lippmann***) so zu erklären, dass durch die Berührung zwischen Quecksilber, Eisen und Säure ein galvanisches Element gebildet wird, dessen Strom am Quecksilber Wasserstoff entwickelt und dasselbe hierdurch polarisirt. Dabei erhöht sich die Oberflächenspannung des Quecksilbertropfens (siehe Bd. I, §. 114, 121), derselbe zieht sich seitlich zusammen, wodurch der Contact mit dem Eisendraht unterbrochen wird. Nunmehr oxydirt die Chromsäure den Wasserstoff, die Polarisation durch den letzteren verschwindet, die Oberflächenspannung nimmt den ursprünglichen kleineren Werth an und der Tropfen verbreitert sich wieder, wodurch er den Contact wieder herstellt u. s. f.

*) Man rechnet durchschnittlich das Bleigewicht (Gerippe) ungefähr = $1/3$, das Plattengewicht (Blei + Füllmasse) = $2/3$ des Gesammtgewichts des Accumulators.

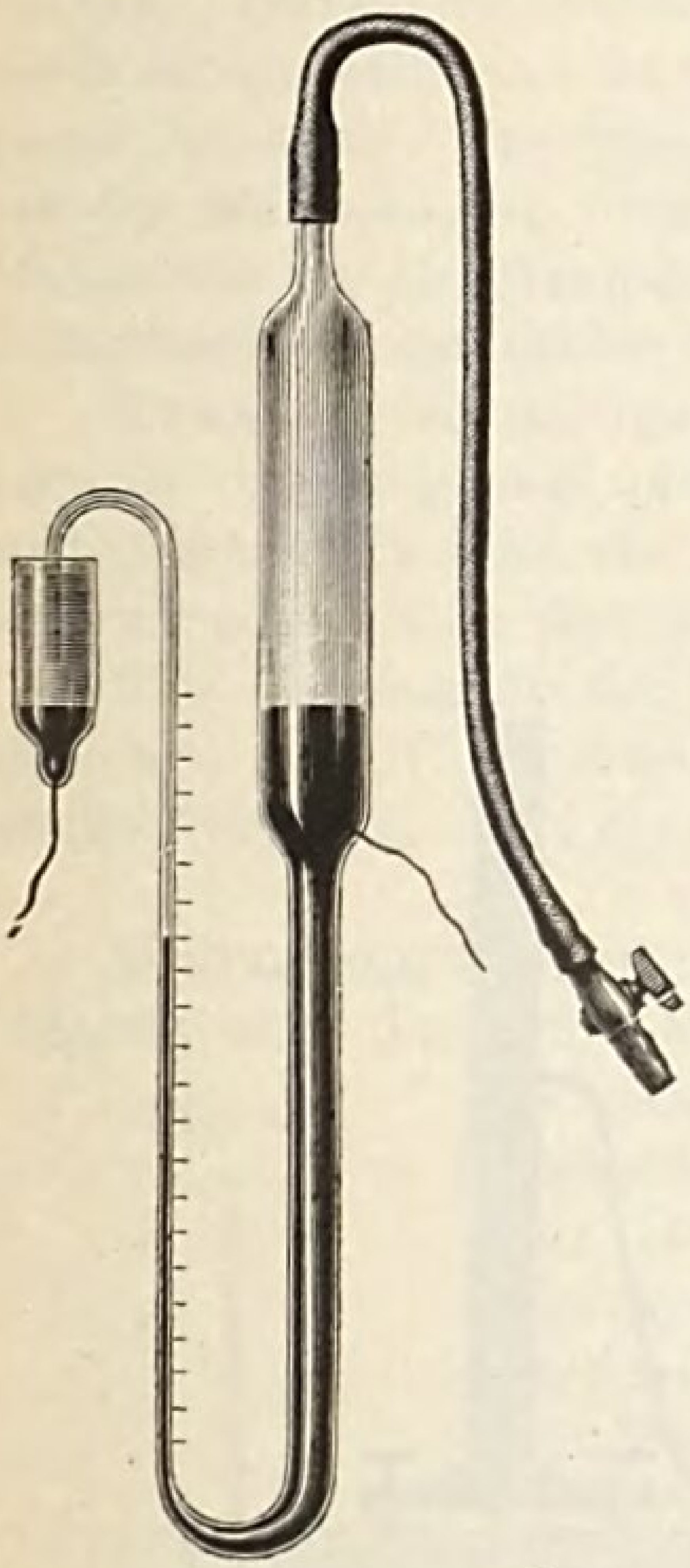
**) Aus diesem Grunde werden z. B. von der Electrical Power Storage Company zweierlei Typen von Accumulatoren geliefert (Rühlmann, Elektrotechn. Zeitschr. [1886] Octoberheft).

***) Pogg. Ann. 149, S. 546 (1873).

Durch die Untersuchungen von Lippmann und Quincke ist weiter erwiesen, dass die Capillarconstante an der Berührungsfläche zwischen Quecksilber und verdünnter Schwefelsäure eine stetige Function der elektromotorischen Kraft der Polarisation an derselben Oberfläche ist. Es muss daher auch die Capillardepression einer mit Schwefelsäure überschichteten Quecksilbersäule in einer engen Glasröhre von dieser elektromotorischen Kraft abhängen.

Um dies zu zeigen, kann der in Fig. 428 abgebildete Apparat*) benutzt werden. Die Capillarröhre ist oben umgebogen und taucht in ein kleines Gefäss mit verdünnter Schwefelsäure. Am Boden enthält letzteres Gefäss ebenfalls Quecksilber. Der Strom wird durch die beiden eingeschmolzenen Platindrähte zugeführt. Durch den mit Hahn verschlossenen Kautschukschlauch kann die Luft über dem weiteren Rohr comprimirt und dadurch das Quecksilber in der Capillarröhre bis zum Ausfliessen gehoben werden. Stellt man den ursprünglichen Druck wieder her, so sinkt das Quecksilber in der Capillarröhre und die letztere füllt sich mit der Säure. Bei einem derartigen Versuche war der Radius der Capillarröhre $r = 0{,}32$ mm, die Depression $h = 14{,}0$ mm, woraus sich die specifische Cohäsion $= a^2 = rh = 4{,}48$, die Capillaritätsconstante

Fig. 428.



$$\alpha = \frac{a^2 s}{2} = \frac{4{,}48 \times 13{,}59}{2} = 30{,}4$$

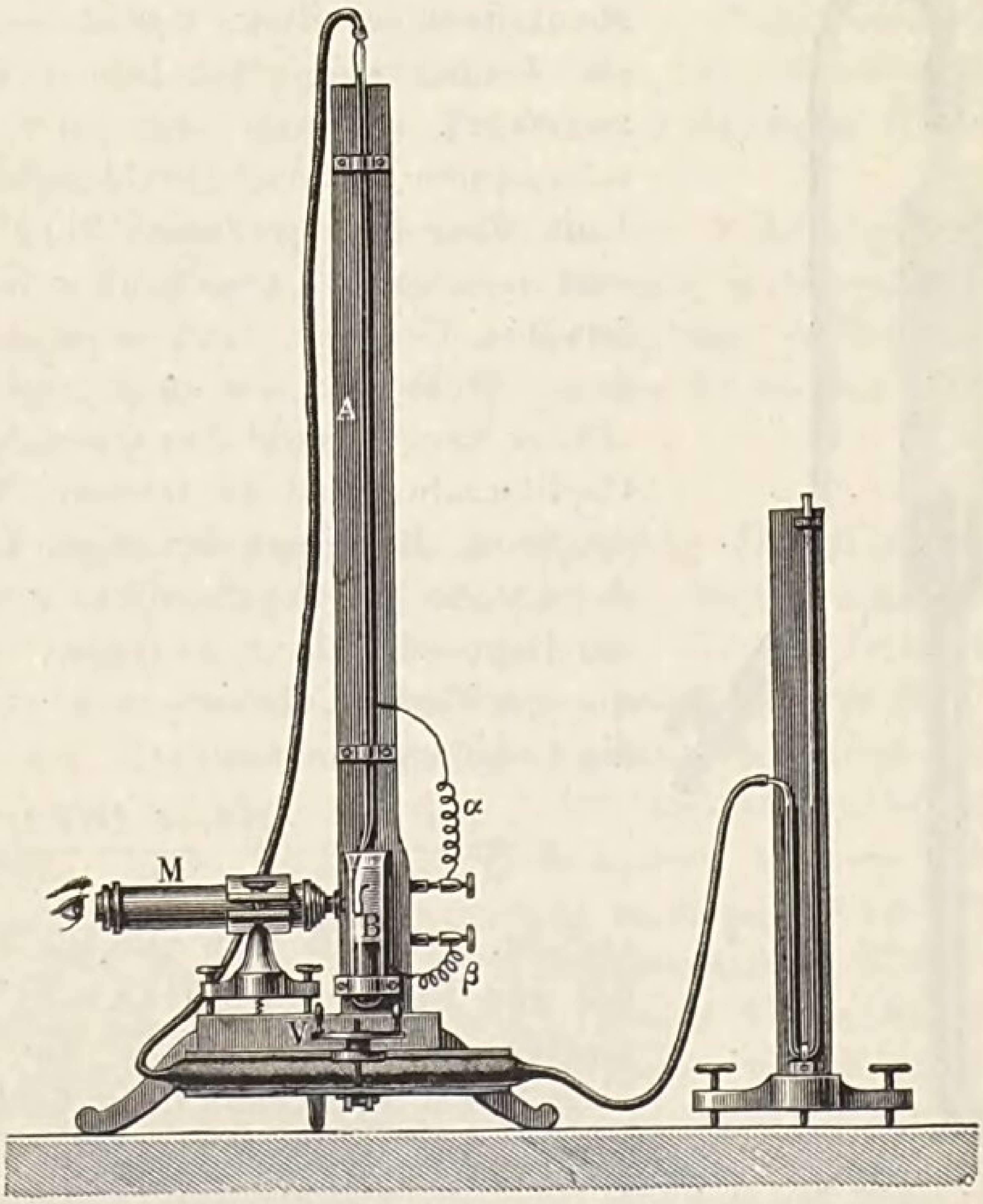
ergiebt. Sobald man nun die Platindrähte mit den Polen eines Daniell'schen Elementes verband, wurde die Depression $h' = 18{,}9$ mm, woraus $a^2 = 6{,}048$ $\alpha = 40{,}6$ folgt. Die elektromotorische Kraft eines Daniell (1,08 Volt) steigerte also die Capillaritätsconstante von 30,4 auf 40,6.

Noch viel empfindlicher wurde der Apparat, als Lippmann das Ende der Capillarröhre in eine sehr feine Spitze auszog und den Druck so weit steigerte, dass das Quecksilber an der Mündung der Spitze eine halbkugelförmige Hervorragung von ungefähr 0,01 mm Radius bildete, dessen Capillardruck einer Quecksilbersäule von 750 mm das Gleichgewicht hielt. Durch ein Mikroskop mit 220facher Vergrösserung wurde

*) Diese wie die folgende Figur ist Wiedemann's Lehre v. d. Elektricität entnommen.

der hervorragende Meniscus beobachtet. Schaltet man nun das Daniell-Element ein, so wird das Quecksilber sofort zurückgezogen; es muss dann der Druck noch weiter gesteigert werden, um die ursprüngliche Lage des Meniscus wieder herzustellen. In dem gegebenen Falle betrug diese Steigerung per Daniell 260 mm Quecksilber. Lippmann hat nun gezeigt, dass diese zur Compensation nöthigen Drucksteigerungen δ für geringe elektromotorische Kräfte V (bis etwa 0,8 Daniell) nahezu proportional diesen Kräften seien, dass sie später nach dem Gesetze einer Parabel, also nach der Gleichung $\delta = const. V^2$ zusammen-

Fig. 429.



hängen, bei $V = 0{,}9$ Daniell ein Maximum erreichen, welches 1,47 mal so gross ist wie der Druck für $V = 0$; für noch grössere V sinkt dann wieder der Druck δ. Hierauf beruht nun das Capillarelektrometer von G. Lippmann, welches in Fig. 429 abgebildet ist. Man erblickt daran zunächst das im unteren Theile mit Quecksilber, im oberen Theile mit verdünnter Schwefelsäure ($^1/_3$ SO_4H_2, $^2/_3$ Wasser) gefüllte Glasgefäss B, in welches das 1 m lange, 7 mm weite, unten in ein 10 mm langes Capillarrohr ausgezogene und umgebogene Glasrohr A eintaucht. Das letztere communicirt durch einen Kautschukschlauch mit dem zur Seite stehenden Quecksilbermanometer, an dem die compensirenden

Drucksteigerungen abgelesen werden. Die Drucksteigerungen werden durch Compression einer Erweiterung in dem Schlauche mittelst der Schraube *V* bewerkstelligt. Das Mikroskop *M* mit Ocularmikrometer dient zur Beobachtung des Quecksilbermeniscus an der Spitze der Capillarröhre. Die Klemmen α und β dienen zur Verbindung mit den Leitern, deren Potentialdifferenz gemessen werden soll.

Beim Gebrauch verbindet man zuerst α mit β, um die Potentialdifferenz auf 0 zu bringen, treibt etwas Quecksilber aus der Capillare heraus, indem man mittelst der Schraube *V* comprimirt, stellt dann den Atmosphärendruck wieder her und stellt das Mikroskop auf den Meniscus ein. Hierauf verbindet man die Klemmen α und β mit den Leitern, deren Potentialdifferenz zu messen ist, und zwar α mit dem vom niedrigeren Potential. Das Quecksilber geht zurück. Man dreht nun bei *V*, bis der Meniscus die ursprüngliche Lage angenommen, und liest am Manometer die Druckzunahme ab. Das Instrument wird mit bekannten Potentialdifferenzen (unter 0,8 Daniell) geaicht.

Graetz*) hat gezeigt, dass man beim Gebrauche dieses Instrumentes sehr vorsichtig sein und insbesondere auf Reinheit des Quecksilbers achten müsse, da sonst die Ablesungen für Potentialdifferenz = 0 sehr abweichend ausfallen und die Messungen unrichtig werden können.

Eine Modification des Instrumentes, welche keine feste Aufstellung erfordert, hat W. Siemens**) beschrieben, ein solches für physiologische Zwecke E. v. Fleischl***).

Wärmeentwickelung durch den elektrischen Strom, Gesetz von Joule. 147 Nachdem wir nun die wichtigsten Gesetze der Stromstärke kennen gelernt haben, gehen wir zur Betrachtung derjenigen Erscheinungen über, welche der elektrische Strom in den durchströmten Körpern hervorbringt, und zwar wollen wir zuerst seine Wirkungen auf Leiter erster Classe, d. h. auf Metalle, untersuchen.

Fig. 430.



Wenn man einen galvanischen Strom durch einen Metalldraht hindurchleitet, so wird derselbe mehr oder weniger erwärmt. Um sich von dieser Thatsache zu überzeugen und das Verhältniss der Erwärmung zur Stromstärke zu ermitteln, kann man den Fig. 430 dargestellten Apparat anwenden. In den Hals eines mit möglichst wasserfreiem Weingeist gefüllten Glasgefässes wird ein Kork eingesetzt, in welchem das Rohr eines Thermo-

*) Beiblätter 3, S. 633.
**) Pogg. Ann. 151, S. 639 (1874).
***) Arch. f. Anat. u. Physiol. 1879, S. 283.

meters und zwei dicke Kupferdrähte stecken. Die unteren Enden der Kupferdrähte sind durch einen spiralförmig gewundenen dünnen Platindraht verbunden, dessen Enden an die Kupferdrähte angelöthet sind, und welcher ganz in den Weingeist eingetaucht sein muss. Wird nun dieser Platindraht mittelst der beiden Kupferdrähte in den Schliessungsbogen einer Volta'schen Säule eingeschaltet, so wird er erwärmt und giebt alsbald seine Wärme an den Weingeist ab, dessen Temperaturerhöhung man an dem Thermometer ablesen kann.

Joule und Lenz haben die Gesetze der Wärmeentwickelung, welche der galvanische Strom in Metalldrähten hervorbringt, näher untersucht und sind fast zu denselben Resultaten gelangt.

Lenz wandte zu seinen Untersuchungen einen Apparat an, welcher dem in Fig. 430 abgebildeten ähnlich war; derselbe wurde mit einer Tangentenbussole (einer solchen, bei welcher der Strom in vielen Windungen um die Nadel geleitet war, so dass schon verhältnissmässig schwache Ströme einen merklichen Ausschlag gaben) in den Schliessungsbogen einer Daniell'schen Batterie gebracht. — Mittelst des Rheostaten wurde der Strom stets auf einer bestimmten Stärke erhalten; unterdessen wurde beobachtet, welche Zeit erforderlich ist, damit das Thermometer im Weingeist um eine bestimmte Anzahl von Graden steigt. Dabei wurde durch ein Herumdrehen des Apparates in einem kleinen Kreise die Flüssigkeit in eine rotirende Bewegung gebracht, wodurch eine gleichmässige Vertheilung der Temperatur im Inneren der Flüssigkeit erzielt wurde.

Um die Fehler zu vermeiden, welche durch den Wärmeverlust an die Umgebung veranlasst werden, wurde der Weingeist unter die Temperatur der Umgebung erkaltet in die Flasche eingefüllt, und der Versuch geschlossen, als seine Temperatur gerade um eben so viele Grade über die Lufttemperatur gestiegen war, als sie anfänglich darunter stand. (Rumford's Kunstgriff, Bd. II, 2.)

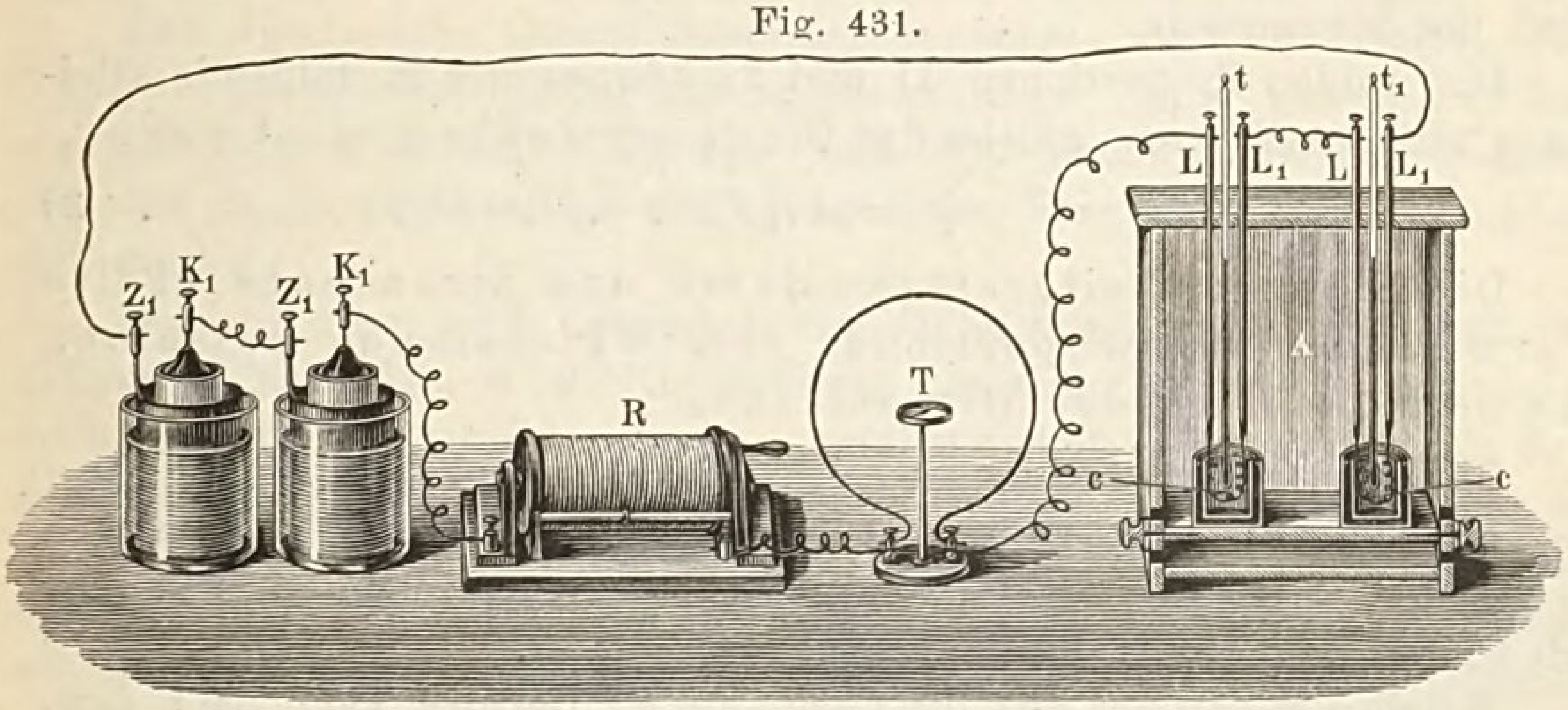
Um die Joule'schen Versuche als Vorlesungsexperimente zu wiederholen, kann man sich eines Apparates bedienen, dessen Anordnung aus Fig. 431 ersichtlich ist. $Z_1 K_1$ ist eine Batterie von mehreren Elementen, R ein Rheostat, T eine Tangentenbussole (schematisch gezeichnet), A jener calorimetrische Apparat, welchen wir im Bande II, 2 bereits beschrieben haben, im Wesentlichen bestehend aus zwei gleichen kleinen Calorimetergefässen cc mit Thermometern t, t_1 und Zuleitungsdrähten L, L_1, L, L_1.

Die Calorimeter werden mit gleichen Mengen Weingeist oder Terpentinöl gefüllt. Die unteren Enden der Zuleitungsdrähte werden innerhalb der Calorimeterflüssigkeit durch dünne, spiralförmig gewundene Platindrähte verbunden. Der Strom geht durch den anfangs auf Null gestellten Rheostaten, dann durch den Ring der Tangentenbussole, hierauf durch die dicken Zuleitungen und durch die beiden Spiralen, endlich zum anderen Pole zurück.

Durch einen ersten Versuch ermitteln wir nun den Einfluss der Grösse des Widerstandes eines Leiterstückes auf dessen Erwärmung durch den Strom. Zu diesem Zwecke wählen wir zu den Platinspiralen zwei Drahtstücke, deren Widerstände R' und R'' wir absichtlich ungleich gross machen. Nehmen wir beide Drähte gleich lang, aber ungleich dick, so können wir durch Wägung das Verhältniss ihrer Querschnitte finden, welches zugleich das umgekehrte Verhältniss ihrer Widerstände ist. Wir lesen die Anfangstemperaturen an t und t_1 ab, schliessen den Strom eine gezählte Anzahl von Minuten hindurch und beobachten nachher die Endtemperaturen.

Nach den im Band II, 2 angegebenen Regeln berechnen wir aus

Fig. 431.



diesen Daten die Wärmemengen Q' und Q'', welche in den beiden Spiralen frei wurden, und finden, wenn der Versuch gut geleitet wurde:

$$\frac{Q'}{Q''} = \frac{R'}{R''} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

Bei gleicher Stromstärke verhalten sich daher die in verschiedenen Leiterstücken entwickelten Wärmemengen wie deren Widerstände.

Bei einem zweiten Versuche ermitteln wir den Einfluss der Stromstärke bei unverändertem Widerstande. Zu diesem Zwecke schalten wir das zweite Calorimeter c ganz aus und bestimmen dann wie früher die in dem Calorimeter c in einer gewissen Zeit entwickelte Wärmemenge Q' und gleichzeitig an der Tangentenbussole T die Stromstärke J_1. Durch Einschaltung von Widerstand mittelst des Rheostaten R reduciren wir sodann die Stromstärke auf den geringeren Betrag J_2 und bestimmen neuerdings die in derselben Zeit im selben Calorimeter entwickelte Wärmemenge Q''. Bei gut geleitetem Versuche werden wir dann finden, dass die Proportion gilt:

$$\frac{Q'}{Q''} = \frac{J_1^2}{J_2^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

Bei gleichem Widerstande verhalten sich die in einem Leiterstück entwickelten Wärmemengen wie die Quadrate der Stromstärken.

Durch einen dritten Versuch können wir uns überzeugen, dass es ganz gleichgültig ist, ob wir die beabsichtigte Stromstärke durch mehrere oder wenigere Elemente, also bei geringerem oder grösserem eingeschalteten Widerstande R herstellen, sowie es auch bei gleicher Stromstärke gleichgültig ist, ob wir dieselbe mittelst Daniell'scher oder Bunsen'scher Elemente erreichen. Die Wärmeentwickelung in einem Leiterstücke ist also, so lange sein Widerstand und die Stromstärke dieselben bleiben, ganz unabhängig von der elektromotorischen Kraft der Stromquelle.

Die beiden Proportionen 1) und 2) können wir in folgende Gleichung zusammenfassen, welche das Gesetz von Joule genannt wird:

$$Q = \alpha R J^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

Die in einem Leiterstücke durch den Strom entwickelte Wärmemenge ist proportional dem Widerstande desselben und dem Quadrate der Stromstärke.

Die Wärmeentwickelung ist natürlich auch der Zeitdauer des Stromes proportional. Die Grösse Q der Gleichung 3) bedeutet demnach die in der Zeiteinheit (Secunde) entwickelte Wärmemenge. Für eine Zeit t wäre die entwickelte Wärmemenge $= \alpha t R J$.

Welchen Werth hat nun die Constante α? Darüber kann nach dem, was wir im §. 126 über die Definition der absoluten Widerstandseinheit festgestellt haben, kein Zweifel mehr sein. Wir definirten die absolute Einheit des Widerstandes als jenen Widerstand, in welchem die absolute Stromeinheit in der Zeiteinheit eine absolute Arbeitseinheit, oder eine dieser äquivalente Wärmemenge entwickelt. α ist also das Wärmeäquivalent der absoluten Arbeitseinheit. Die absolute Arbeitseinheit ist das Erg, die ihm äquivalente Wärmemenge ist $= \frac{1}{42\,000\,000}$ Grammcalorien. Wenn wir also die Stromstärke J und den Widerstand R nach absoluten Einheiten (C. Gr. S.), die Zeit t nach Secunden, die Wärme nach Grammcalorien messen, so wird die Constante:

$$\alpha = \frac{1}{42\,000\,000} = 0{,}000\,000\,024.$$

Messen wir aber den Widerstand R nach Ohm, welches Maass $= 10^9$ absolute Widerstandseinheiten (C. Gr. S.) ist, so wird α auch 10^9 mal grösser. Messen wir aber gleichzeitig die Stromstärken nach Ampère, welches Maass $= \frac{1}{10}$ des absoluten Strommaasses (C. Gr. S.) ist, so wird α wiederum $\frac{1}{10^2}$ mal kleiner.

Für die Maasse: Ampère, Ohm, Secunde und Grammcalorie erhalten wir demnach:

$$\alpha = 0{,}239,$$

also die Wärme, welche ein Strom von J Amp. in einem Leiter von R Ohm pro Secunde entwickelt $= 0{,}239\, RJ^2$ Grammcalorien.

Wir haben bisher die Erwärmung eines Leiterstückes untersucht, in welchem keine elektromotorische Kraft ihren Sitz hat, und welches durch den Strom keinerlei chemische oder mechanische Veränderungen erleidet. Wir müssen zur Gültigkeit des Joule'schen Gesetzes noch ergänzend die Bedingung hinzufügen, dass keinerlei elektrische Wirkung auf benachbarte Leiter oder Magnete, kurz keinerlei Arbeitsleistung nach aussen stattfinde, so dass als einzige Stromwirkung die Erwärmung auftritt.

Das Joule'sche Gesetz lässt sich zunächst, wie Joule selbst und Becquerel gezeigt haben, auf solche flüssige Leiter anwenden, bei welchen zwar chemische Vorgänge durch den Strom eingeleitet werden, die aber durch gleichzeitige entgegengesetzte Vorgänge wieder compensirt werden.

Solche Leiter sind Lösungen von Metallsalzen zwischen unpolarisirbaren Elektroden, z. B. Kupfervitriol zwischen Kupferplatten oder noch genauer Zinkvitriol zwischen amalgamirten Zinkplatten. An der Eintrittsstelle des Stromes wird das Metall gelöst, an der Austrittsstelle wieder abgeschieden. Die damit verbundenen entgegengesetzten Wärmeeffecte compensiren sich und es kommt daher diejenige Erwärmung, welche dem Joule'schen Gesetze entspricht, zur unveränderten Geltung.

Endlich gilt das Joule'sche Gesetz für Elektrolyte überhaupt, also auch für die Flüssigkeiten der galvanischen Elemente selbst, wie Joule, Favre und jüngst mit grösserer Genauigkeit H. Jahn*) bewiesen haben. Mit der Wärmeentwickelung eines geschlossenen Elementes verhält es sich überhaupt, wie wir später eingehender zeigen werden, folgendermaassen.

Die Entstehung des elektrischen Stromes verbraucht unter allen Umständen eine seiner Energie gleiche Menge chemischer Energie. Ist die durch die chemischen Vorgänge im Elemente frei werdende Energie grösser als die auf den Strom verwendete, so entsteht ausser dem Strom direct ein Ueberschuss von Wärme im Elemente, der dessen Temperatur erhöht. Ist, was ebenfalls vorkommt, die durch die chemischen Processe verfügbar gewordene Energie kleiner, als die auf den Strom aufzuwendende, so wird der fehlende Antheil aus dem Wärmevorrath des Elementes entnommen, also dasselbe abgekühlt. Ausserdem wird dann die Stromenergie, wenn sie keine andere Umwandlung erleidet, in Wärme verwandelt und längs des ganzen Stromkreises im Verhältniss der Widerstände auf die einzelnen Theile der Leitung vertheilt. Wird also

*) H. Jahn, Wiedem. Ann. 25, S. 65 (1885).

das Element innerhalb des Bechers geschlossen, so bleibt alle Wärme im Elemente. Geht aber der Schliessungskreis nach aussen, so kommt ein desto grösserer Bruchtheil der Stromwärme in der äusseren Leitung zur Entwickelung, je grösser ihr Widerstand ist im Verhältniss zum Widerstand des ganzen Kreises.

Es sei w der innere, r der äussere Widerstand einer Kette, J die Stromstärke, Q_1 die innerhalb, Q_2 die ausserhalb des Elementes entwickelte Wärmemenge, so ist:

$$Q_1 = \alpha w J^2$$
$$Q_2 = \alpha r J^2,$$

mithin die gesammte vom Strome herstammende Wärme im ganzen Stromkreise inclusive Element:

$$Q = Q_1 + Q_2 = \alpha\,(w + r)\,J^2.$$

Nennen wir den Gesammtwiderstand R, so ist also

$$Q = \alpha R J^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4)$$

Das Joule'sche Gesetz gilt also nicht bloss für Leiterstücke, sondern für den ganzen Stromkreis.

Da nach dem Ohm'schen Gesetze $RJ = E =$ der elektromotorischen Kraft, so folgt aus 4) auch

$$Q = \alpha\, EJ \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 5)$$

oder endlich

$$Q = \alpha\,\frac{E^2}{R} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 6)$$

Die Gleichungen 4), 5) und 6) sind verschiedene Formen des Joule'schen Gesetzes, bezogen auf den ganzen Stromkreis.

Die Gleichung 5) scheint auf den ersten Anblick im Widerspruch zu stehen mit dem Ergebniss des oben erwähnten dritten Versuches, nach welchem die elektromotorische Kraft ohne Einfluss auf die Erwärmung ist, während aus 5) folgt, dass bei gleicher Stromstärke J die Erwärmung proportional der elektromotorischen Kraft E sei. Der Widerspruch löst sich einfach, wenn man überlegt, dass es sich beim erwähnten Versuche um die Erwärmung eines gegebenen Leiterstückes von constantem Widerstande, dagegen beim Satze 5) um die Erwärmung des ganzen Stromkreises handelt, dessen Widerstand, um die gleiche Stromstärke J zu liefern, in demselben Verhältnisse geändert werden muss, in welchem die elektromotorische Kraft sich ändert. Ein Beispiel wird dies noch klarer machen.

Nehmen wir ein Daniell'sches Element mit der elektromotorischen Kraft $E = 1{,}1$ Volt und ein Bunsen'sches mit der elektromotorischen Kraft $E' = 1{,}8$ Volt. Schliessen wir ersteres durch einen Draht von solcher Länge, dass der Gesammwiderstand $R = 1{,}1$ Ohm wird, so herrscht in dem Kreise die Stromstärke

$$J = \frac{1{,}1}{1{,}1} = 1 \text{ Amp.}$$

In einem Stücke dieses Drahtes von solcher Länge, welche 1 Ohm Widerstand hat, wird demnach pro Secunde die Wärme α, im ganzen Schliessungskreise die Stromwärme 1,1 α entwickelt. Um bei dem Bunsen-Elemente ebenfalls die Stromstärke 1 zu erhalten, müssen wir seinem Schliessungskreise den Gesammtwiderstand $R' = 1{,}8$ Ohm geben; ein Stück desselben vom Widerstande 1 Ohm entwickelt wiederum die Wärme α, der ganze Schliessungskreis aber 1,8 α.

Die Gleichungen 5) und 6) können statt auf die elektromotorische Kraft des Elementes, d. h. statt auf die Potentialdifferenz an seiner Erregungsstelle, auch auf die Potentialdifferenz an den Enden irgend eines Leiterstückes bezogen werden, wodurch die Sache noch klarer wird. Es seien die Potentialhöhen an zwei Punkten des Schliessungskreises v und v', also deren Potentialdifferenz $= v - v'$ (gemessen in Volts), das dazwischen befindliche Leiterstück habe den Widerstand $= r$ Ohm, dann ist die daselbst herrschende Stromstärke $i = \frac{v - v'}{r}$ und die per Secunde entwickelte Wärmemenge in Grammcalorien:

$$q = \alpha r i^2 = \alpha\,(v - v')\,i = \alpha\,\frac{(v - v')^2}{r},$$

wo α wiederum $= 0{,}239$ zu setzen.

Denken wir uns, dass bei dem oben betrachteten Bunsen-Elemente der Gesammtwiderstand 1,8 Ohm sich so vertheile, dass das Element selbst 0,2 Ohm, der schliessende Draht 1,6 Ohm Widerstand besitzt, so ist für die Enden des letzteren die Potentialdifferenz gleich der Klemmspannung $= 1{,}6$ Volt, die Wärmemenge $q = 1{,}6\,\alpha$, die Wärme, welche der Strom innerhalb des Elementes entwickelt $= 0{,}2\,\alpha$.

Schliesslich wollen wir noch eine Aufgabe lösen, welche praktische Anwendung finden kann, wenn es sich darum handelt, den elektrischen Strom als Wärmequelle so gut als möglich auszunutzen.

Es sei ein Element oder eine Batterie von bestimmter elektromotorischer Kraft E und vom inneren Widerstande W gegeben. Bei W seien die etwaigen Poldrähte bereits mit einbegriffen. Es soll nun derjenige Widerstand R eines Leiters berechnet werden, welcher beim Einschalten in den Schliessungskreis das Maximum von Wärmeentwickelung erfährt. Nach Joule's Gesetz ist diese Wärmeentwickelung in dem Widerstande R gegeben durch

$$Q = \alpha R J^2 = \alpha R\,\frac{E^2}{(W + R)^2},$$

dieser Ausdruck erhält den grössten Werth, wenn $R = W$, nämlich

$$Q = \frac{\alpha\,E^2}{4\,W}.$$

Will man also in einem Drahtstücke durch eine gegebene Batterie die grösstmögliche Wärmemenge entwickeln, so mache man den Wider-

stand des Drahtstückes ebenso gross, als der Widerstand in der Batterie ist.

Macht man den Widerstand des Drahtstückes kleiner als den der Batterie, so wird allerdings die Stromstärke und die Gesammtwärmeentwickelung grösser, aber es entfällt davon ein kleinerer Bruchtheil auf das Drahtstück und der grössere Theil auf die Batterie. Macht man dagegen den Widerstand des Drahtstückes grösser als den der Batterie, so erhält er allerdings einen grösseren Bruchtheil der Gesammtwärme als die Batterie, aber diese Gesammtwärme ist wegen der geringeren Stromstärke kleiner als im günstigsten Falle.

Ist umgekehrt das Drahtstück mit bestimmtem Widerstande und die Anzahl der Elemente gegeben, so wird man, um das Maximum der Erwärmung zu erzielen, die Elemente so verbinden, dass der Gesammtwiderstand der Batterie dem des Drahtstückes am nächsten kommt; also hinter einander bei sehr grossem, neben einander bei sehr kleinem Widerstande des Drahtstückes.

148 **Stromenergie, Stromeffect*) und deren Maasse.** Wir bringen kurz in Erinnerung, dass wir als Arbeit die Ueberwindung einer Kraft längs eines Weges definiren und dieselbe im praktischen Maasssysteme nach Kilogrammmetern, im absoluten Maasssysteme nach Erg messen. Dabei ist es ganz gleichgültig, in welcher Zeit der Angriffspunkt der Kraft den Weg zurücklegt, das heisst, der Begriff der Arbeit ist ganz unabhängig von der Zeit. Etwas Anderes ist es mit der Arbeitsintensität oder dem Effect*). Wir verstehen darunter die Arbeit per Secunde und messen diese Grösse daher im praktischen Maasssysteme nach Secundenkilogrammmetern, im absoluten Maasssysteme nach Secundenerg. In der Technik werden 75 Secundenkilogrammmeter als „Pferdekraft" bezeichnet und dieses Maass durch das Zeichen HP = *IP* (vom englischen *horsepower*) ausgedrückt. Es ist also:

$$1\ \text{HP} = 75\ \text{Sec.kg.m.} = 75 \times 9{,}81 \times 10^7\ \text{Sec.Erg.} = 75 \times 9{,}81\ \text{Watt}^{**}).$$

Diese Maasse für Arbeit und Effect werden dann auch für alle anderen Energiemengen und Energiequellen angewendet.

Eine gehobene Wassermasse giebt beim Niedersinken eine Arbeit oder Energie ab, welche durch das Product aus Gewicht und Fallhöhe gegeben ist. Ein Wassergefälle leistet per Secunde eine Arbeit, hat also einen Effect, welcher gleich ist dem Producte aus dem Gewichte der Wassermenge, welche per Secunde durch den Querschnitt strömt (der Stromstärke) mit der verfügbaren Niveaudifferenz.

Nun übertragen wir diese Anschauungen auf die Elektricität. Haben wir auf dem inneren Beleg einer Leydener Flasche eine Elektricitätsmenge angehäuft und dadurch eine Potentialniveaudifferenz zwischen

*) Man gebraucht dafür auch den Ausdruck „Leistung".

**) Es ist nämlich 1 Watt = 10^7 Erg per Secunde.

diesem Beleg und dem äusseren geschaffen, und verbinden dann die Belege, so stürzt die Elektricitätsmenge gewissermaassen aus dieser Potentialhöhe hernieder und liefert dadurch eine Energie in Form von Wärme oder Arbeit, welche (nach elektrostatischem Maasse) gemessen wird durch das Product aus Elektricitätsmenge und Flaschenpotential.

Fliesst dagegen ein constanter Strom eine beliebige Zeit lang durch einen Leiter, so liefert er in dieser Zeit eine Energie, welche wir messen durch das Product der durch den Querschnitt gegangenen Elektricitätsmenge mit der Potentialdifferenz an den Enden des Leiters. Die Stromarbeit oder Stromenergie wird daher (nach elektromagnetischem Maasse) gemessen durch das Product der Anzahl Coulomb, welche den Leiter passirt haben, mit der Anzahl Volt. Das Maass für die Stromenergie heisst daher Voltcoulomb (abgekürzt VCb), für welches Maass auch der Name Joule vorgeschlagen ist. Dabei ist die Zeit ganz aus dem Spiele. Ob die betreffende Anzahl Coulomb einen Leiter in einer Secunde oder erst in einer Stunde durchfliessen, hat, wenn es bei der gleichen Potentialdifferenz geschah, keinen Einfluss auf die Stromenergie. Anders steht es mit dem Stromeffect. Dieser ist gleich der Stromenergie per Secunde und daher gleich der Anzahl Coulomb per Secunde, multiplicirt mit der Anzahl Volt, d. h. gleich der Stromstärke in Ampère, multiplicirt mit der Anzahl Volt. Den Stromeffect messen wir also nach Voltampère (abgekürzt VA). Wir fassen das über die praktischen elektromagnetischen Maasse der Stromenergie und des Stromeffects Vorgetragene folgendermaassen zusammen:

Maass der Stromenergie:

1 Joule $=$ 1 Voltcoulomb (VCb) $= 10^7$ Erg $= \frac{1}{9,81}$ Meter-Kilogrgew. (Gravitationsmaass) äquivalent mit 0,239 Grammcalorien.

Maass des Stromeffects:

1 Watt $=$ 1 Voltampère (VA) $= 10^7$ Erg per Secunde $= \frac{1}{9,81}$ Meter-Kilogrgew. per Sec. $= \frac{1}{736}$ Pferdekraft, äquivalent mit 0,239 Grammcalorien per Secunde.

Im §. 83, S. 272, haben wir als Resultat der Untersuchungen von Riess über die erwärmende Wirkung des Entladungsschlages der Leydener Flasche den Ausdruck erhalten:

$$h = n\,\frac{q^2}{s} = n\,\frac{q}{s}\,q,$$

worin h die Erwärmung, n eine Constante, q die Elektricitätsmenge, s die Batterieoberfläche, mithin $\frac{q}{s}$ die Dichtigkeit der Flaschenladung vorstellt.

Da diese letztere der Potentialdifferenz der Flasche proportional ist, so ergiebt sich in Uebereinstimmung mit Obigem die Wärmeentwickelung beim Entladen der Flasche proportional dem Producte aus Elektricitätsmenge und Potentialdifferenz. Würde man die Ladung der Flasche nicht nach elektrostatischem Maasse, sondern nach elektromagnetischem Maasse (nach Coulomb), sowie das Potential ebenfalls nicht nach elektrostatischem Maasse, sondern elektromagnetisch nach Volt messen, so würde auch der Proportionalitätscoëfficient n mit der Constanten α des §. 147 übereinstimmen. Man hat dies constatirt, indem man einerseits die Potentialdifferenz an der galvanischen Kette mit dem absoluten Elektrometer (nach elektrostatischem Maasse), andererseits die entladene Elektricitätsmenge der Flasche elektromagnetisch gemessen hat; letzteres durch Beobachtung des Nadelausschlages an einem Galvanometer, dessen Drahtwindungen genügend isolirt waren, um die Entladung der Flasche durch sie hindurch leiten zu können. War durch solche Versuche das Werthverhältniss zwischen elektrostatischer Einheit der Elektricitätsmenge und Coulomb, sowie zwischen elektrostatischer Einheit des Potentials und Volt ermittelt, so konnte man die quantitativ angestellten Messungen an dem Luftthermometer von Riess mit der Constanten des Joule'schen Gesetzes vergleichen. Dabei wurde eine der Schwierigkeit solcher Versuche entsprechende Uebereinstimmung constatirt und dadurch eine neue Bestätigung für die Behauptung gewonnen, dass sich die sogenannte statische Elektricität von der galvanischen in ihrem Wesen nicht unterscheidet.

149 **Glühen von Metalldrähten durch den elektrischen Strom.** Im §. 147 war stets nur von der Wärmeentwickelung, nicht aber von der Temperaturerhöhung des Schliessungskreises die Rede Wenn die Temperatur der metallischen Leiter steigt, so vergrössert sich ihr Widerstand und hierdurch ändert sich auch die Grösse der Wärmeentwickelung. Von dieser Aenderung wollen wir aber vorläufig absehen. Offenbar steigt die Temperatur der Drähte so lange, bis sie entweder abschmelzen, oder bis die Wärmeverluste nach aussen der Wärmezufuhr durch den Strom das Gleichgewicht zu halten beginnen. Den Wärmeverlust per Zeiteinheit V kann man bei einem cylindrischen Drahte von der Länge l und der Dicke d annäherungsweise proportional setzen einmal der Oberfläche $\pi d l$, dann dem Emissionsvermögen ε und dem Temperaturüberschusse über die Umgebung t. Wir setzen also

$$V = k \,.\, \pi \,.\, d \,.\, l \,.\, \varepsilon \cdot t,$$

wo k ein Constante ist. Für die zugeführte Wärmemenge gilt nach dem Joule'schen Gesetze:

$$Q = \alpha r J^2.$$

Die Temperatur wird also so lange steigen, bis $V = Q$, also bis

$$k \,.\, \pi \,.\, d \,.\, l \, \varepsilon \,.\, t = \alpha r J^2$$

geworden ist. Die constante Temperatur t berechnet sich demnach:

$$t = \frac{\alpha}{k} \cdot \frac{r J^2}{\pi d . l \varepsilon}.$$

Nun ist der Widerstand r, wenn wir mit s den specifischen Leitungswiderstand bezeichnen, gegeben durch

$$r = \frac{4 l}{d^2 \pi} s.$$

Setzt man diesen Werth oben ein, so folgt:

$$t = \frac{4 \alpha}{k \pi^2} \cdot \frac{s J^2}{\varepsilon d^3} = K \cdot \frac{s J^2}{\varepsilon d^3} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

indem wir die neue Constante K einführen.

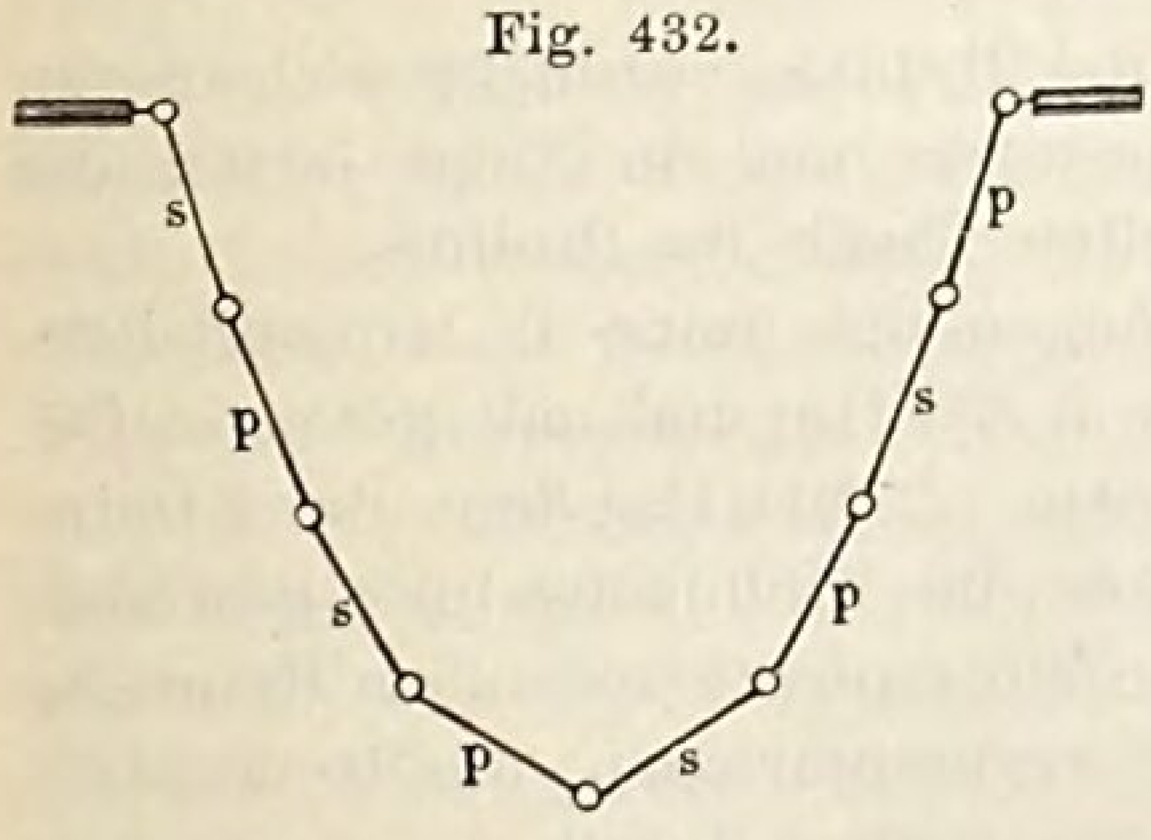
Die Theorie verlangt also, dass die Temperaturerhöhung der Drähte sei:

1. proportional dem specifischen Leitungswiderstande,
2. proportional dem Quadrat der Stromstärke,
3. verkehrt proportional dem Emissionsvermögen,
4. verkehrt proportional dem Cubus der Drahtdicke,
5. unabhängig von der Drahtlänge, vorausgesetzt, dass die Stromstärke dieselbe sei.

Da nun die Temperatur, bei welcher die Körper zu glühen beginnen, für alle dieselbe zu sein scheint, so ergeben sich hieraus über das Glühen von Drähten folgende qualitative Versuche.

Aus 1. folgt, dass in einem Schliessungsbogen, der aus lauter gleich dicken, aber aus Metallen ungleichen specifischen Leitungswiderstandes hergestellten Drahtstücken zusammengesetzt ist, die schlechter leitenden Stücke bereits erglühen können, während die besser leitenden noch dunkel bleiben.

Fig. 432.

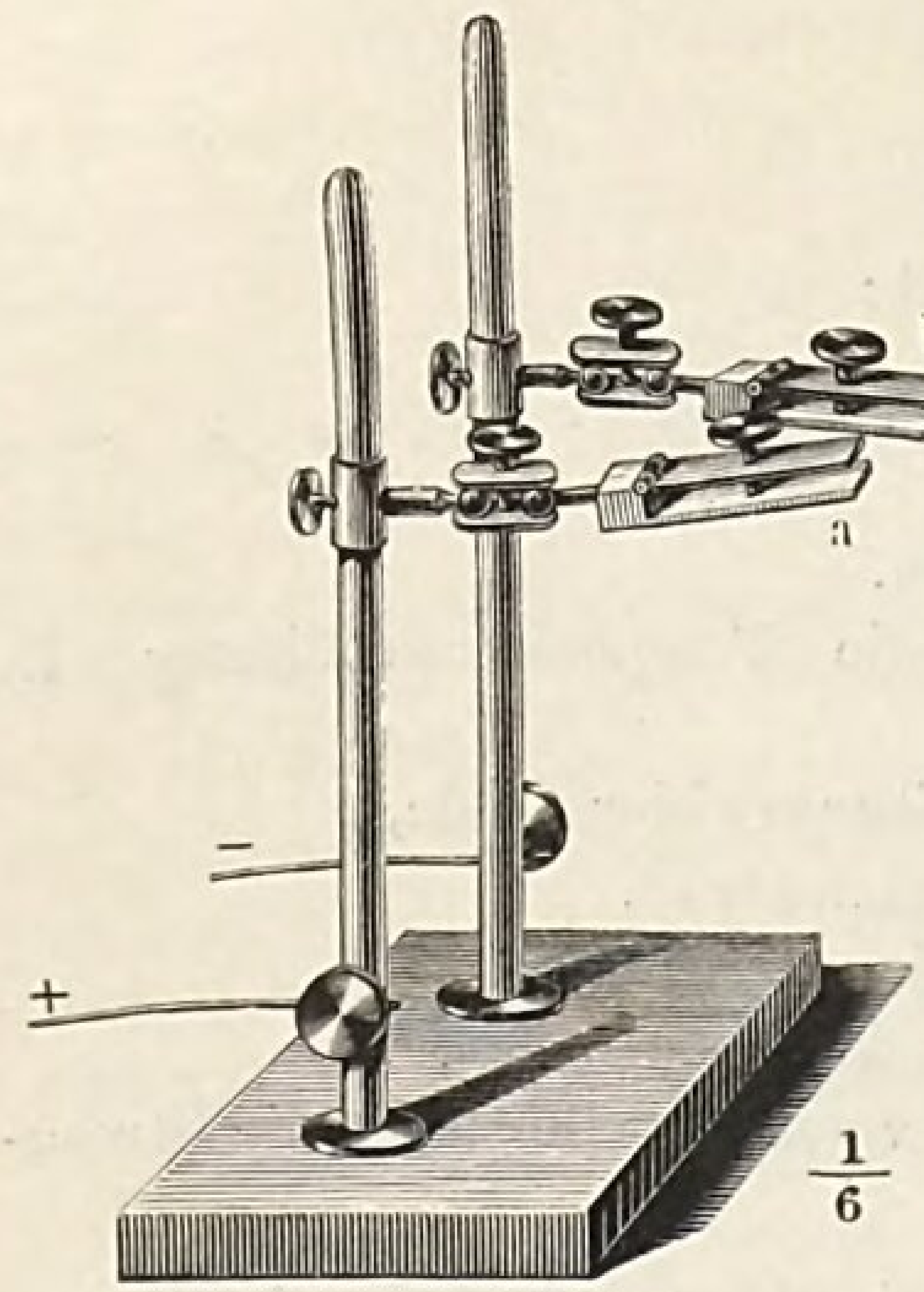


Leitet man z. B. einen genügend starken Strom durch eine Kette, Fig. 432, welche abwechselnd aus gleich dicken Platin- und Silberdrähten besteht, so werden bei einer gewissen Stromstärke die Platindrähte erglühen, dagegen die Silberdrähte dunkel bleiben. Aus 4. folgt ein ähnlicher Versuch, bei welchem die Kette aus abwechselnd ungleichen dicken Platindrähten besteht, wobei dann die dünnen glühen, die dicken dunkel bleiben.

Bezüglich 2. und 5. mag folgender Versuch gemacht werden: Man spannt von einem längeren ziemlich dünnen Platindrahte ein mehrere Centimeter langes Stück zwischen die Klemmen a und b der in Fig. 433 (a. f. S.) abgebildeten Polhalter und schaltet in den Schliessungskreis

ausserdem noch eine Tangentenbussole und einen Rheostaten. Der letztere muss aber aus dicken Drähten hergestellt sein, damit er nicht ebenfalls ins Glühen gerathe und hierdurch verdorben werde. Man regulirt nun den Strom so, dass der Draht eben glüht. Hierauf verlängert man den Draht zwischen *a* und *b*. Nun hört derselbe zu glühen auf, weil durch den vermehrten Widerstand die Stromstärke gesunken ist. Schaltet man aber jetzt am Rheostat so viel Widerstand aus, dass die Stromstärke die frühere wird, so erfolgt das Glühen ebenfalls wie früher. Bezüglich Punkt 3. verweisen wir auf das Band II, 2. beschriebene Experiment, durch welches gezeigt wird, dass ein in Luft befindlicher galvanisch glühender Platindraht in einer Umgebung von Wasserstoff zu glühen aufhört, weil dieses Gas mehr Wärme wegführt als Luft.

Fig. 433.



Den Einfluss der Temperatur des Drahtes auf seinen Leitungswiderstand und den daraus folgenden indirecten Einfluss auf die Erwärmung kann man auf folgende Weise demonstriren. Man bringe eine Platindrahtspirale durch einen Strom zum mässigen Rothglühen. Taucht man hierauf die glühende Spirale zur Hälfte in kaltes Wasser, so kühlt sich diese Hälfte ab, während der nicht eintauchende Theil viel lebhafter zu glühen beginnt.

Durch das Abkühlen der Hälfte des Drahtes verringert sich dessen Widerstand, folglich steigt die Stromstärke und in Folge davon die Wärmeentwickelung im nicht abgekühlten Theile des Drahtes.

Quantitative experimentelle Prüfungen des unter 1) mitgetheilten Satzes an glühenden Drähten sind von J. Müller und mit grösserer Genauigkeit von Zöllner angestellt worden. J. Müller kam durch seine Versuche, bei welchen freilich die Stärke des Glühlichtes nur geschätzt wurde, zu dem mit der Gleichung 1) im Widerspruch stehenden Resultate, dass, um denselben Grad des Glühens hervorzubringen, die Stromstärke dem Durchmesser proportional sein müsse, während nach 1) das Quadrat der Stromstärke dem Cubus des Durchmessers proportional sein müsste.

Zöllner fand unter Anwendung seines Photometers, dass verschieden dicke Drähte desselben Metalls gleiche Lichtmengen ausstrahlen, wenn die Stromstärken dem Durchmesser proportional sind. Dieses Gesetz würde mit dem Joule'schen in Uebereinstimmung sein, wenn man annehmen dürfte, dass die Intensität des Glühlichtes der Temperatur proportional sei. Wir haben schon oben bemerkt, dass die Gleichung 1)

auf mehreren Annahmen beruht, welche nicht strenge zutreffen, weshalb es nicht zu verwundern ist, wenn die directen Beobachtungen etwas abweichende Resultate liefern.

J. Müller*) hat deshalb den Gegenstand später nochmals aufgenommen, und unter Annahme der Richtigkeit des Gesetzes, dass bei gleichem Glühgrad die Stromstärke dem Durchmesser proportional sein müsse, durch ein graphisches Verfahren eine Anzahl Folgerungen gezogen, unter welchen insbesondere jene interessiren, dass 1) bei gegebenen Drahtlängen und gegebener Batterie für eine bestimmte Drahtdicke ein Maximum des Werthes $\frac{J}{d}$ erhalten wird, und dass zweitens, wenn ein Draht von gegebener Länge glühen soll, die Dicke desselben zwischen zwei bestimmten Grenzwerthen liegen muss.

A. v. Waltenhofen**) hat dann diese nämlichen und noch einige weitere Folgerungen auf mathematischem Wege entwickelt. Es ergab sich dabei, dass das Maximum des Werthes $\frac{J}{d}$ jener Drahtdicke entspricht, welche den Widerstand des glühenden Drahtes dem halben Widerstande des ganzen Schliessungskreises gleich macht, dass ferner die beiden Werthe der Drahtdicken, welche demselben Werth von $\frac{J}{d}$ entsprechen, bei einer gewissen Länge des Drahtes in Einen zusammenfallen und bei Ueberschreitung dieser Länge derselbe Werth von $\frac{J}{d}$ überhaupt nicht mehr (unter sonst gleichen Umständen) erreicht werden kann.

Das Erglühen von Metalldrähten durch den elektrischen Strom findet praktische Anwendung in der Sprengtechnik, in der Chirurgie und im Beleuchtungswesen. Bei der erstgenannten Verwendung werden in jede Patrone zwei dicke isolirte Zuleitungsdrähte eingeführt, welche durch einen sehr dünnen, kurzen Stahl- oder Platindraht leitend verbunden sind; der letztere ist direct vom Schiesspulver oder einer leicht entzündlichen Substanz umgeben, welche die Entzündung des Sprengmaterials vermittelt.

In der Chirurgie verwendet man in manchen Fällen mit Vortheil eine Schlinge aus Platindraht, welche in kaltem Zustande applicirt und dann erst durch Druck auf eine Contactvorrichtung zum Glühen gebracht wird (galvano-kaustische Schlinge), oder man verwendet den Platindraht in isolirten Windungen auf einen Porcellanstift gewickelt (Porcellanbrenner). Endlich bedient man sich des weissglühenden Platindrahtes innerhalb einer schützenden gläsernen Hülle als Erleuchtungsvorrichtung im Inneren von Körperhöhlen.

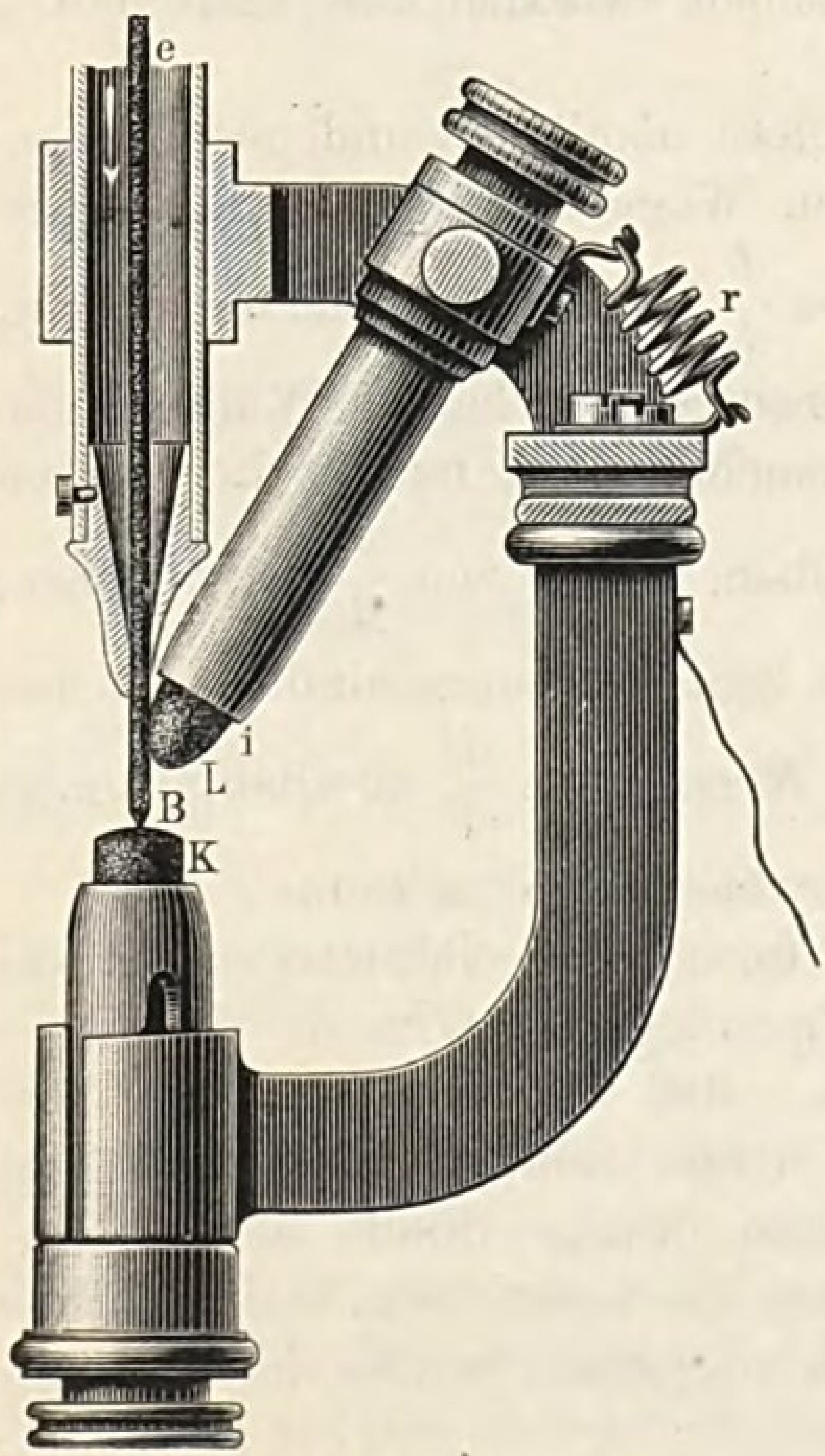
Ueber die Anwendung galvanisch glühender Leiter zur Beleuchtung soll der nächste Paragraph das Wesentlichste mittheilen.

*) Ber. d. naturf. Ges. zu Freiburg VI.

**) Sitzber. d. Königl. böhm. Ges. d. W. in Prag 1874.

150 **Das elektrische Glühlicht.** Glühende Metalldrähte eignen sich aus mehrfachem Grunde nicht zur praktischen Anwendung des elektrischen Stromes als Lichtquelle. Dagegen ist hierzu die Kohle sehr geeignet, da sie unschmelzbar ist. Man unterscheidet nun zweierlei Systeme von Glühlichtlampen; bei dem ersten, weniger zweckmässigen System wird ein Kohlenstäbchen an freier Luft durch einen starken Strom zur Weissgluth gebracht und in dem Maasse, als es dabei verbrennt, durch Nachschieben erneuert. Bei dem zweiten System wird das Verbrennen der Kohle durch Einschluss derselben in ein Vacuum verhindert. Zu den ersteren Glühlampen gehören jene von Regnier, Werdermann, Marcus u. A. Fig. 434 zeigt eine Lampe nach Regnier mit Weglassung der oberen unwesentlichen Theile. Der dünne Kohlenstift *c* wird innerhalb einer leitenden Führung durch ein Gewicht nach abwärts gegen den Graphitblock *B* gedrückt, während von seitwärts das Graphitstück *L* mittelst Federkraft angedrückt wird. *B* und *L* dienen zur Zu- und Abführung des Stromes, der den untersten Theil des dünnen Kohlenstiftes zur Weissgluth erhitzt. In dem Maasse, wie derselbe abbrennt, wird er von oben durch das auf ihm lastende Gewicht nachgeschoben.

Fig. 434.



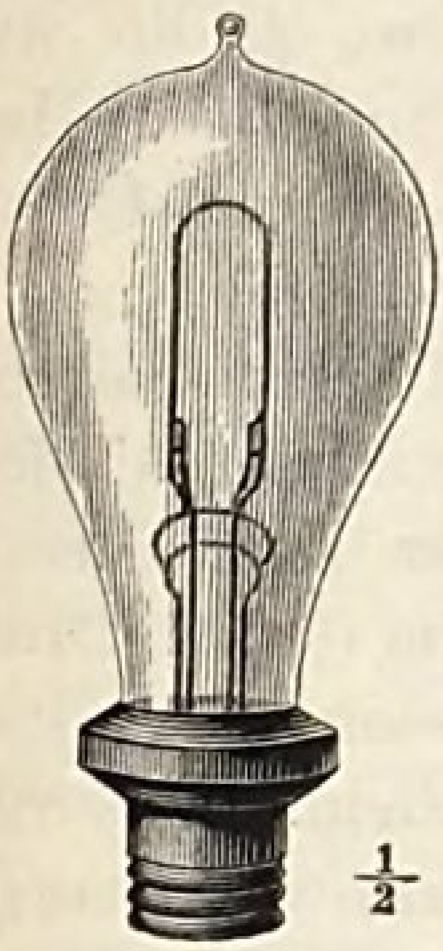
Von viel grösserer Bedeutung sind die Vacuumglühlampen. Nachdem schon Jobart in Brüssel 1838 vorgeschlagen, das Glühen einer Kohle im luftleeren Raume zur Beleuchtung zu benutzen, und Moleyns in Cheltenham 1841 die erste wirkliche Vacuumglühlampe construirt hatte*), gelang es nach manchen vergeblichen Versuchen mehrerer Vorläufer dem bekannten Amerikaner Thomas Edison 1879 haltbare Vacuumlampen herzustellen, wobei er als glühenden Körper eine feine verkohlte Papier- oder später Bambusrohrfaser benutzte.

Eine solche Kohlenfaser in Bügelform wird an ihren Enden galvanoplastisch mit Platindrähten leitend verbunden und diese in die Wandung einer Glaskugel eingeschmolzen, welche sodann luftleer gepumpt wird. Fig. 435 zeigt eine solche Edison-Vacuumlampe mit Fassung in halber Grösse. Form und Material des Kohlenbügels wurden seitdem

*) Geschichte der Elektricität von D. G. Albrecht, S. 302.

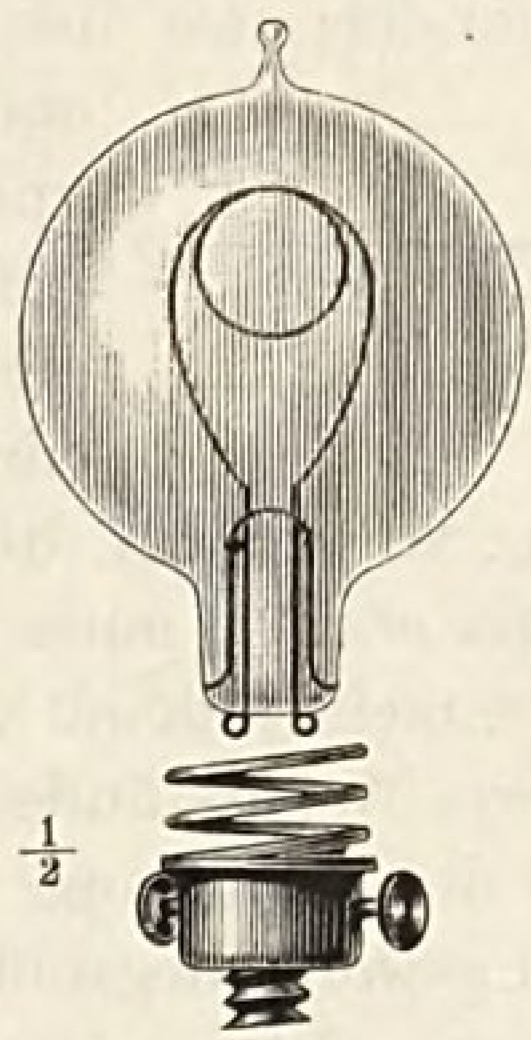
von anderen Firmen mannigfach verändert. Die Lichtstärke derselben im weissglühenden Zustande wechselt von einer Lampe zur anderen von 6 bis 100 Normalkerzen, ihr Widerstand von 4 Ohm bis über 200 Ohm. Dabei ist bemerkenswerth, dass der Widerstand der Kohle im Gegensatze zu den Metallen im heissen Zustande bedeutend geringer ist als im kalten. Dem verschiedenen Widerstand gemäss ist auch die nöthige Potentialdifferenz an den Zuleitungsdrähten, welche die zum hellen Glühen erforderliche Stromstärke hervorzubringen vermag, von einer Lampe zur anderen verschieden. So erfordert z. B. eine Edison-Lampe von 16 Kerzen Lichtstärke einen Strom von 0,5 Amp.; da ihr Widerstand im heissen Zustande 228 Ohm beträgt, so muss die Potentialdifferenz $= 0{,}5 \times 228 = 117$ Volt betragen. Die Lampe von Swan

Fig. 435.



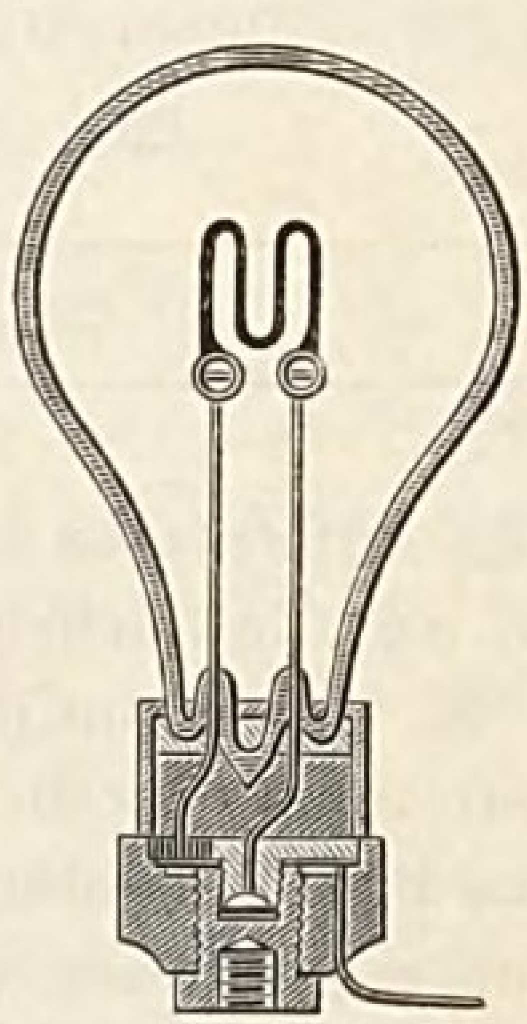
$\frac{1}{2}$

Fig. 436.



$\frac{1}{2}$

Fig. 437.



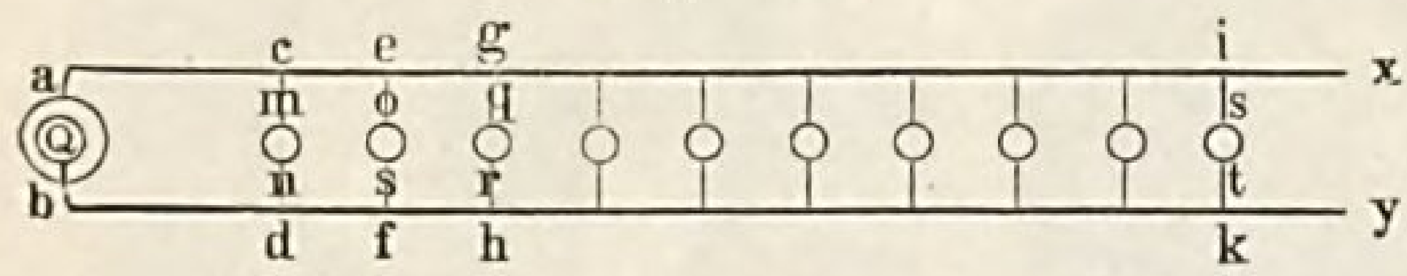
(Fig. 436), von 16 Kerzen Lichtstärke, erfordert einen Strom von 1,14 Amp., ihr Widerstand beträgt 43 Ohm, folglich die nöthige Potentialdifferenz $1{,}14 \times 43 = 49$ Volt. Die Lampe von Maxim, Fig. 437, ebenfalls für 16 Kerzen Lichtstärke, bedarf einen Strom von 1,37 Amp., ihr Widerstand ist 40 Ohm, die erforderliche Spannung $1{,}37 \times 40 = 54{,}8$ Volt. Da der Elektrotechniker insbesondere wissen muss, welche Potentialdifferenz die zuführenden Leitungen haben müssen, damit die Lampen ordentlich glühen, so werden die Lampen gewöhnlich nach der Anzahl Volt bezeichnet, welche sie brauchen.

Durch Multiplication der Stromstärke i mit der Potentialdifferenz e erhalten wir den elektrischen Effect ie in Bezug auf die Lampe, so z. B. ergeben die aufgeführten drei Lampen die elektrischen Effecte $ei = 58{,}5$, 55,9, 75,1 Voltamp. Durch Division dieser Effecte mit der Lichtstärke λ (ausgedrückt durch die Anzahl Kerzen) erhält man den elektrischen Effect per Lichteinheit, $\frac{ei}{\lambda}$, wobei im Allgemeinen die Lampe desto vortheilhafter sein wird, je geringer dieser Effect ausfällt. Endlich erhalten wir noch durch Division der Zahl 736 durch den Effect per Lichteinheit die Anzahl Lichteinheiten, $\frac{736\,\lambda}{ei}$, welche durch eine Pferdekraft gewon-

nen werden. Diese Anzahl beträgt ungefähr 180 bis 220 Kerzen. Trotz sorgfältiger Construction werden die Kohlenbügel allmälig zerstört, nachdem sie 1000 bis 2000 Stunden lang gebraucht worden sind.

Hat man n Lampen zugleich in Thätigkeit zu setzen, deren jede e Volt benöthigt, so würde man, wenn man alle n Lampen hinter einander schaltete und den Widerstand der Zwischenleitung vernachlässigte, eine elektromotorische Kraft ne bedürfen. Dazu käme dann noch ein weiterer Bedarf an elektromotorischer Kraft, wenn der Widerstand der Leitung nicht zu vernachlässigen ist. Eine solche Schaltung wäre also für viele Lampen nicht vortheilhaft, weil man eine zu grosse elektromotorische Kraft benöthigte, die mehr Isolationsschwierigkeiten und Gefahren mit sich bringt. Auch würden beim Zerreissen eines einzigen Kohlenbügels alle übrigen Lampen verlöschen. Man schaltet daher zweckmässiger eine Gruppe von Lampen neben einander, wie dies das Schema der Fig. 438 andeutet, wo Q die Stromquelle, ax und by die Hauptleitungen, cm und dn u. s. f. die Abzweigungen zu den einzelnen Lampen vorstellen.

Fig. 438.



Sollen die entfernteren Lampen, wie z. B. st, die gleiche Potentialdifferenz erhalten, wie die nächste Lampe mn, so muss entweder der Widerstand ei und dk der Hauptleitung verschwindend klein sein (dicke Drähte), oder man muss durch grössere Widerstände der Zweige cm, dn die Differenz der Widerstände in der Zuleitung ausgleichen. Die Stromstärke muss bei dieser Schaltungsweise begreiflicherweise n mal so gross sein, als für eine einzelne Lampe. Die weiteren Erörterungen über diesen Gegenstand gehören in die Elektrotechnik, die sich ja seit einigen Jahren zu einer besonderen Disciplin ausgebildet hat.

151 **Der galvanische Funken.** Beim Oeffnen und unter gewissen Umständen auch beim Schliessen eines Stromkreises beobachtet man an der Unterbrechungsstelle eine funkenartige Erscheinung. Um diesen Funken recht schön zu sehen, genügt ein einziges Plattenpaar nicht, es sei denn, dass man eine Magnetisirungsspirale, wie wir sie im nächsten Capitel werden kennen lernen, in den Schliessungsbogen eingeschaltet habe. Diese Verstärkung des Funkens rührt von einer Inductionswirkung her, die erst später besprochen werden kann. Betrachten wir zunächst den Funken, wie ihn etwa eine Bunsen'sche Säule von 6 bis 10 Bechern oder irgend eine andere dieser äquivalente Säule giebt.

Sehr schön beobachtet man die Funkenerscheinung, wenn man eine Feile an dem einen Pole der Säule befestigt und einen mit dem anderen Pole verbundenen Eisendraht darüber hinführt. Bei dem hierbei rasch auf einander folgenden Oeffnen und Wiederschliessen der Kette entsteht ein lebhaftes Funkensprühen, welches offenbar von einer Verbrennung der Eisentheilchen herrührt, die glühend aus einander fahren.

Anders erscheint der galvanische Funken, wenn das Schliessen und Oeffnen der Kette durch Eintauchen und Herausziehen des einen Poldrahtes in und aus Quecksilber geschieht, welches mit dem anderen Pole in leitender Verbindung steht. Hier ist kein Umhersprühen zu beobachten. Man sieht, wenn man den einen Poldraht in das Quecksilber eintaucht, namentlich aber, wenn man ihn herausnimmt, einen ganz abgerundeten, lebhaft weiss glänzenden Funken, der von einem klatschartigen Geräusch begleitet ist. Auch in dieser Form ist höchst wahrscheinlich die Lichterscheinung von einer secundären Verbrennung, und zwar hier von einer Verbrennung des Quecksilbers, begleitet.

Ein Ueberspringen von Funken in Distanz, wie wir es bei der Reibungselektricität kennen gelernt haben, findet bei den gewöhnlichen galvanischen Säulen nicht statt. Jacobi hat sich durch genaue Messungen überzeugt, dass die Pole einer Säule von 12 Grove'schen Plattenpaaren bis auf 0,0013 mm genähert werden konnten, ohne dass ein Funken übersprang. 12 solche Elemente geben zusammen eine Potentialdifferenz von 22,8 Volt $= \frac{22,8}{300} =$ 0,076 elcktrostatischen Einheiten*); nun sind aber nach Thomson (Seite 250) 2,33 solche Einheiten erforderlich, um einen Funken auf 0,01 cm zu liefern. Es ist also begreiflich, dass man ein solches Ueberspringen erst erhalten kann, wenn man die Zahl der Plattenpaare weit über das Gewöhnliche vermehrt. Gassiot hat eine Säule construirt, welche aus 3520 Bechern bestand, deren jeder einen Zinkstab und einen Kupfercylinder enthielt. Zur Ladung diente Regenwasser. Die 3520 Glasbecher waren auf 44 eichene Bretter vertheilt, von denen immer 11 ein Gestell, einem Becherrepositorium ähnlich und von vier starken Ständern getragen, bildeten. Besondere Sorgfalt war auf die Isolirung verwendet worden; die Becher waren gefirnisst und standen auf Glasplatten, die ebenso wie die Bretter mit einem Firnissüberzuge versehen waren.

Es liess sich wohl erwarten, dass diese Batterie im ungeschlossenen Zustande bedeutende Spannungserscheinungen hervorbringen musste; und in der That divergirten die Pendel eines Goldblattelektroskops schon, wenn man es dem einen Pole auf 5 bis 7 cm näherte. Sobald die Kette geschlossen wurde, verschwanden alle Zeichen von Spannung. Als die Pole der Batterie auf 0,5 mm genähert wurden, schlugen unausgesetzt Funken zwischen ihnen über. In einem Falle dauerte dies Phänomen ununterbrochen Tag und Nacht fünf Wochen lang. Mehrere Monate nach ihrer Errichtung zeigte die Batterie noch keine Abnahme ihrer Kraft.

Neuere Versuche über den elektrischen Funken haben Warren de la Rue und H. W. Müller**) mit der im §. 117 erwähnten Batterie von 11000 Elementen angestellt.

*) Siehe die Anmerk. S. 305.

**) *Nature* XVIII, XX.

Auch mit der rheostatischen Maschine von Planté §. 145 lassen sich, wie erwähnt, ähnliche Wirkungen erzielen.

Wir werden später noch einmal auf die Natur des galvanischen Funkens zurückkommen.

152 **Das elektrische Bogenlicht.** Oeffnet man einen Stromkreis, der von einer Säule von ungefähr 30 oder mehr Bunsen'schen Elementen gebildet ist, und sorgt dafür, dass die Endstücke des Leiters an der Unterbrechungsstelle nicht zu weit von einander entfernt werden, so gelingt es, den galvanischen Funken als dauernden Lichtbogen zu erhalten. Die Distanz, bis auf welche man, ohne den Lichtbogen zu erlöschen, die Enden entfernen darf, hängt von der Stärke der Batterie und von der Natur der Endstücke ab.

Als H. Davy zugespitzte Kohlenstücke als Pole einer Säule von 2000 Plattenpaaren (Zink und Kupfer) anwandte, bildete sich bei dem eben angegebenen Verfahren zwischen den beiden Kohlenspitzen, welche selbst ein blendendes Licht ausstrahlten, ein nach oben gewölbter Flammenbogen, welcher erst erlosch, als die Polstücke 7 cm weit von einander entfernt worden waren.

Obgleich die von Davy angewandten Kohlen möglichst feste und dichte Holzkohlen waren, so waren sie bei diesem Versuche doch einem raschen Verbrennen ausgesetzt; um diese Verbrennung zu verhindern, schloss er sie in einen Glasballon ein, welcher luftleer gemacht werden konnte.

Mit grossem Vortheile lassen sich nun die zu dem Davy'schen Versuche verwendeten Holzkohlen durch zugespitzte Stäbchen ersetzen, welche aus der Bunsen'schen Kohlenmasse oder aus Retortenkohle verfertigt sind. Wegen ihrer grösseren Dichtigkeit leitet diese Masse den Strom besser als Holzkohle und es genügt deshalb zur Anstellung des Versuches schon eine geringere Anzahl von Plattenpaaren; dann aber sind solche Bunsen'sche Kohlenstücke weit weniger der Verbrennung ausgesetzt, weshalb sie die Anwendung des luftleeren Raumes entbehrlich machen.

Die jetzt gebräuchlichen cylindrischen Kohlenstäbchen haben ungefähr folgende Widerstände:

Durchmesser	Widerstand in Ohm per Meter	Durchmesser	Widerstand in Ohm per Meter
4 mm	3,13	10 mm	0,50
5	2,00	12	0,35
6	1,32	15	0,22
8	0,78	20	0,13

Für Ströme bis zu 2 Amp. Stärke genügen Stäbchen von 8, bis 4 Amp. von 10 mm Durchmesser. Als positive Elektrode empfiehlt sich sogenannte Dochtkohle, als negative eine homogene Kohle.

Neuerer Zeit werden noch härtere, der Gaskohle nahestehende Kohlenstäbchen von verschiedenen Firmen hergestellt, unter welchen sich die der Gebrüder Siemens u. Comp. in Charlottenburg durch sehr ruhiges Licht auszeichnen.

Der Abstand, bis auf welchen man die Kohlenspitzen von einander entfernen kann, ohne dass der Strom unterbrochen wird und der Flammenbogen verlischt, darf um so grösser gemacht werden, je mehr die elektromotorische Kraft der Säule wächst und je weniger fest die Kohlenmasse der Polspitzen ist.

Bei Anwendung einer Säule von 6 bis 10 Bunsen'schen Bechern erscheint zwischen den Kohlenspitzen kaum ein glänzendes Sternchen; mit einer Säule von 30 bis 50 solcher Becher erhält man aber schon ein Licht, welches das Drummond'sche Kalklicht weit hinter sich zurücklässt.

Um den Strom zwischen den Kohlenspitzen einzuleiten, ist es nicht durchaus nothwendig, die Kohlenpole erst mit einander in Berührung zu bringen, es kann auch dadurch geschehen, dass man zwischen den beiden in gehörige Entfernung gebrachten Kohlenspitzen einen elektrischen Funken überschlagen lässt.

Das Licht an den Kohlenspitzen ist viel zu blendend, als dass man die Details der Erscheinung direct beobachten könnte; will man diese näher untersuchen, so ist es am zweckmässigsten, den Flammenbogen durch eine Linse von passender Brennweite oder ein entsprechendes Linsensystem auf einen Schirm zu projiciren. Ganz vorzüglich eignet sich zu diesem Zwecke die in Bd. II, 1, beschriebene Dubosq'sche Lampe.

Fig. 1 auf Tab. I stellt den auf die angegebene Weise projicirten galvanischen Lichtbogen dar. Die Lichtstärke des Lichtbogens selbst ist nicht bedeutend, dagegen strahlen die Enden der beiden Kohlenspitzen, auf welchen der Lichtbogen gleichsam aufsitzt, ein blendendes Licht aus. Bei aufmerksamer Betrachtung des Phänomens fällt aber sogleich ein auffallender Unterschied zwischen den beiden Polspitzen auf. Der negative Pol erscheint mehr zugespitzt, während das Ende des positiven Pols mehr oder weniger ausgehöhlt erscheint. In dieser Aushöhlung ist die Lichtentwickelung am intensivsten. Während die negative Polspitze längere Zeit fast unverändert erscheint, nimmt die Masse des positiven Pols rasch ab und ist dabei ein Ueberwandern materieller Theilchen vom positiven zum negativen Pole nicht zu verkennen.

Die Wärmeentwickelung ist übrigens an den beiden Polen sehr ungleich, sie ist viel bedeutender am positiven als am negativen Pole, wie man schon daraus ersieht, dass das Kohlenstück, welches den positiven Pol bildet, nach Unterbrechung des Stromes noch eine Zeit lang fortglüht, während das Kohlenstäbchen, welches den negativen Pol bildet, alsbald vollkommen dunkel erscheint. Wild sucht diese unipolare Wärmeentwickelung auf thermoelektrische Effecte zurückzuführen.

Wenn man bei diesem Versuche den einen der beiden Kohlenpole durch einen starken Eisendraht ersetzt, so wird derselbe unter lebhaftem Funkensprühen verbrannt; ein Kupferdraht verbrennt mit grünlichem Lichte und ein Streifen Zinkblech mit bläulicher Flamme, wenn sie bei der Bildung des galvanischen Lichtbogens die Stelle des einen Kohlenpols vertreten.

Die unter diesen Umständen entwickelte Wärme genügt, um an einen dicken Platindraht sogleich eine Kugel anzuschmelzen.

Der galvanische Lichtbogen entsteht auch, wenn beide Pole durch Metall gebildet sind. Bei leicht schmelzbaren oder bei leicht oxydirbaren Metallen, wie Zink oder Eisen, ist er grösser als beim Platin oder Silber. Besonders hell ist er, wenn Quecksilber einen Pol bildet. Die Grösse des Lichtbogens steht in Beziehung zur grösseren oder geringeren Leichtigkeit, mit welcher die Substanz der Pole sich zu zertheilen fähig ist; denn da der Lichtbogen durch Ueberführung fein vertheilter Substanz von einem Pole zum anderen erzeugt und erhalten wird, so muss seine Bildung nothwendig durch eine geringe Cohäsion der Polstücke begünstigt werden; deshalb kann man auch zwischen Kohlenspitzen unter sonst gleichen Umständen den grössten Lichtbogen hervorbringen.

Der Flammenbogen zeigt in seiner Lage und Gestalt eine grosse Veränderlichkeit, indem die blendenden Ausgangspunkte desselben fortwährend ihre Stelle ändern.

Nach den Versuchen von van Breda findet eine Ueberführung materieller Theilchen, wenn auch vorherrschend, doch nicht ausschliesslich vom positiven zum negativen Pole statt. Er experimentirte im leeren Raume und leitete den Uebergang des Stromes zwischen den beiden Polen durch eine starke elektrische Entladung ein. Als zwei Eisenkugeln als Pole gedient hatten, fand sich, dass das Gewicht der positiven um 309 mg abgenommen hatte, während das Gewicht der negativen nicht etwa grösser, sondern um 55 mg kleiner geworden war. Als zwischen zwei kupferne, als Pole dienende Kugeln eine isolirte Eisenplatte gehalten worden war, hatte die positive Kugel um 63, die negative um 360 g an Gewicht zugenommen. Beide hatten sich mit Eisentheilchen bedeckt, welche von der Platte kamen.

Der galvanische Lichtbogen hat scheinbar einen grossen Widerstand, der meist ungefähr 9 Ohm beträgt. Schaltet man nämlich einen Lichtbogen in eine Stromleitung ein, so wird die Stromstärke ebenso viel geschwächt, wie wenn man ein Drahtstück von 9 Ohm Widerstand eingeschaltet hätte. Dies kommt aber, wie Edlund nachgewiesen, von einer elektromotorischen Gegenkraft des Bogens her. Um diese zu messen, hat V. v. Lang*) die in §. 140 beschriebene Methode angewendet. Er nahm statt der vier Elemente in Fig. 409, S. 484, deren 64 und schaltete an den Stellen *e* und *f* noch je ein Bogenlicht ein. Nachdem dann

*) Wien. Akad. Ber. 91, II (1885), S. 844 u. 95, II (1887), S. 84.

der Widerstand dieses Zweiges durch einen entsprechenden im Zweige *ac* abgeglichen war, ersetzte er die beiden Bogenlichter durch einen anderen Widerstand in der Leitung *nd*, bis wieder das Galvanometer auf Null stand und erhielt auf diese Weise den scheinbaren Widerstand der beiden neben einander geschalteten Bogenlichter, dessen doppelter Werth dann den scheinbaren Widerstand eines solchen Bogenlichtes ergab. Dieser, multiplicirt mit der Stromstärke, giebt die elektromotorische Gegenkraft, welche im Mittel mehrerer Versuche, bei denen die Stromstärke von $3^1/_2$ bis 7 Amp. variirte, den Betrag von 37 Volt ergab. So z. B. war bei einem der Versuche die Stromstärke $J = 4{,}00$ Amp., dabei waren einmal in den Zweig eingeschaltet die beiden Bogenlichter und 2,10 Ohm Drahtwiderstand, dann bei derselben Stromstärke kein Bogenlicht und 6,62 Ohm Drahtwiderstand.

$$2\,(6{,}62 - 2{,}10) = 2 \times 4{,}52 = 9{,}04 \text{ Ohm}$$

ist demnach der Widerstand eines Bogenlichtes,

$$9{,}04 \times 4{,}00 = 36{,}16 \text{ Volt}$$

die elektromotorische Gegenkraft desselben.

Die Distanz der Kohlenspitzen wurde dabei constant erhalten.

Edlund und dann auch V. v. Lang haben noch auf andere Art diese Grösse gemessen. Führt man von den beiden Kohlen eine Nebenleitung zu einem Galvanometer mit grossem Widerstande, so kann man ganz wie bei Fechner's Methode, §. 140, die Potentialdifferenz der Kohlen p in Volt messen. Diese stammt zum Theil von der gesuchten elektromotorischen Kraft, zum Theil aber auch von einem wirklichen Widerstande her, welcher der Entfernung der Kohlenspitzen l proportional und demnach $= bl$ gesetzt werden kann, wo b der Widerstand des Bogens von der Länge 1 ist. Dieser Widerstand bl, multiciplirt mit der Stromstärke i, giebt die von ihm herrührende Potentialdifferenz. Dazu kommt nun noch die gesuchte der elektromotorischen Gegenkraft a, so dass die wirklich beobachtete Potentialdifferenz

$$p = a + bli$$

ist. Variirt man nun den Abstand l der Kohlen, so erhält man mehrere solcher Gleichungen, aus denen man a berechnen kann. So fand z. B. v. Lang:

$$a = 35 \text{ Volt},$$

$$b = 1{,}32 \text{ Ohm (für je 1 mm Bogenlänge)};$$

für Elektroden aus Platin, Eisen, Nickel, Kupfer, Silber, Zink, Cadmium erhielt v. Lang $a = 27{,}4$, 25,0, 26,2, 23,9, 15,2, 19,9, 10,3 Volt.

Diese Versuche machen es begreiflich, warum man, um einen wirklichen Lichtbogen und nicht bloss glühende Kohlenspitzen zu erhalten, einer Stromquelle von beträchtlicher elektromotorischer Kraft, jedenfalls über 35 Volt, in der Regel von 40 bis 50 Volt, bedarf.

Nach Untersuchungen von Nebel*) hängt die Grösse a auch von der Dicke der Elektroden ab, und wird bei steigender Stromstärke vermindert, wie auch Peuckert**) und Luggin***) gefunden haben. Es ist dies wahrscheinlich die Folge der Verminderung des Widerstandes durch die höhere Temperatur der Gase.

Luggin hat ferner neben anderen interessanten Beobachtungen auch noch die Höhe des Potentials längs des Lichtbogens untersucht. Der letztere war horizontal gelegt und bildete die beiden Zweige ac und dc des Wheatstone'schen Brückenschemas (Fig. 398, S. 469). Die Kohlenspitzen a und d waren durch eine Nebenleitung mit zwei grossen Widerständen, welche die Zweige ab und bd bildeten, unter einander verbunden. Vom Punkte b führte der Brückendraht durch das Galvanometer und dann zu einer zugespitzten, dünnen Kohle c, welche in den Bogen gesenkt wurde. Führte man deren Spitze längs des Bogens hin und her, so musste auch das Verhältniss der Widerstände $ab:bd$ geändert werden, um den Brückenstrom auf Null zu bringen. Auf diese Weise gelang es zu zeigen, dass insbesondere bei reinen Kohlen zwischen dem Lichtbogen und der positiven Elektrode ein relativ grosses Potentialgefälle herrscht, während dasselbe längs des Bogens selbst nur gering ist. Ein Gehalt der Kohle an flüchtigen Salzen vermindert dieses Potentialgefälle, woraus sich die Thatsachen erklären, die wir im nächsten Paragraphen mittheilen wollen.

153 **Photometrische Vergleichung des elektrischen Bogenlichtes.** Ueber die Lichtstärke des galvanischen Flammenbogens hat unter Anderen Casselmann†) Versuche angestellt. Er wandte zu denselben ein Bunsen'sches Photometer an, wie wir es im zweiten Bande dieses Lehrbuches kennen gelernt haben. Die Kohlenstücke, zwischen denen der Lichtbogen erzeugt wurde, waren aus derselben Masse gebildet, welche zur Herstellung der Kohlencylinder der Bunsen'schen Kette dient; jedoch waren sie noch auf verschiedene Weise präparirt worden, indem sie mit Lösungen von salpetersaurem Strontian, Borsäure etc. getränkt und nochmals stark geglüht wurden. Die so präparirten Kohlenstücke geben einen, je nach der angewandten Substanz verschieden gefärbten, sehr ruhigen Lichtbogen, der (bei einer Säule von 44 Bunsen'schen Bechern) erst erlischt, wenn die Kohlenspitzen 7 bis 8 mm von einander entfernt werden, während der unruhige Lichtbogen der rohen Kohle schon bei 5 mm Entfernung erlischt.

In den Strom war gleichzeitig eine Tangentenbussole eingeschaltet, so dass die jeder gemessenen Lichtstärke entsprechende Stromstärke bestimmt werden konnte.

*) Rep. d. Phys. von Exner 22 (1886), S. 527.
**) Zeitschr. f. Elektrot. 1885, S. 111.
***) Wien. Akad. Ber. 96, II (1887), S. 759.
†) Pogg. Annal. Bd. LXIII, S. 576.

Die folgende Tabelle giebt die jedem Falle entsprechende Lichtstärke der beiden hellen Punkte, sammt dem Bogen verglichen mit der Lichtstärke einer Stearinkerze, und zwar für jede Kohlenart einmal bei ganz kleiner, dann bei möglichst grosser Entfernung der Kohlenspitzen. — Die Werthe der Stromstärke sind auf Ampère reducirt:

	Entfernung der Kohlenspitzen	Stromstärke	Lichtstärke
Rohe Kohle	0,5 mm 4,5	9,1 6,5	932 139
Kohle mit salpetersaurem Strontian	0,5 6,75	11,5 8,4	353 274
Kohle mit Aetzkali	2,5 8	9,7 7,9	150 75
Kohle mit Zinkchlorid . .	1,0 5,0	7,7 6,4	624 159
Kohle mit Borax u. Schwefelsäure	1,5 5,0	6,9 6,1	1171 165

Die Tabelle zeigt uns, dass mit der Entfernung der Spitzen die Lichtstärke und die Stromstärke abnimmt. Durch die meisten der Substanzen, mit welchen die Kohle behandelt wurde, ist der Lichtbogen zwar ruhiger und eine grössere Entfernung der Kohlenspitzen möglich, aber keine grössere Lichtstärke erzielt worden, dies ist nur der Fall bei der Kohle, die in eine Mischung von Borax mit Schwefelsäure getaucht war.

Auch bei unveränderter Entfernung der Spitzen nimmt die Lichtstärke zu, wenn die Stromstärke wächst.

Die gewöhnlichen Bogenlichter, welche mit einem Strom von 9 bis 10 Amp. und einer Spannung von 45 bis 48 Volt betrieben werden, geben durchschnittlich eine mittlere Lichtstärke von 52 Carcellampen = 395 deutschen = 348 Münchnerkerzen. Die Lichtintensität wechselt sehr nach der Richtung zur Axe der Kohlen, deren Beschaffenheit und nach sonstigen Umständen.

Nach den Versuchen von Fizeau und Foucault ist die photographische Wirksamkeit des durch 46 Bunsen'sche Zinkkohlenbecher erzeugten Kohlenlichtes 34mal so gross als die des Drummond'schen Kalklichtes, während die Lichtstärke nur ungefähr dreimal so gross ist.

Die ausgezeichneten chemischen Wirkungen des elektrischen Lichtes rühren daher, dass es sehr reich an blauen, violetten und ultravioletten Strahlen ist, was auch daraus hervorgeht, dass die eigenthümlichen Far-

benerscheinungen fluorescirender Körper bei einer Beleuchtung durch das galvanische Kohlenlicht sehr schön hervortreten.

Seit Erfindung der dynamoelektrischen Maschine hat man Bogenlichter von enorm gesteigerter Lichtstärke, welche bis über 30 000 Kerzen geben, herzustellen vermocht. Auch die photometrischen Methoden zur Messung ihrer Lichtstärken sind weiter ausgebildet worden, worüber wir auf die elektrotechnische Literatur verweisen müssen.

154 Regulatoren (Lampen) für elektrisches Bogenlicht.

Der Anwendung des elektrischen Bogenlichtes zu Beleuchtungszwecken stand anfangs die Schwierigkeit entgegen, die Distanz der Kohlenspitzen constant zu erhalten. Die zu diesem Zwecke construirten Handregulatoren erfordern die ununterbrochene Bedienung durch Menschenhand. Es handelte sich also um automatisch wirksame Vorrichtungen, Bogenlichtregulatoren genannt, welche die Kohlenspitzen in dem Maasse einander nähern, in welchem sie abbrennen. Da überdies die positive Elektrode nahe doppelt so schnell verzehrt wird, wie die negative, so müssen alle besseren Regulatoren so eingerichtet sein, dass sie die positive Kohle noch einmal so rasch nachschieben als die negative. Die bewegende Kraft dieser Vorrichtungen und das Princip der Regulirung beruht auf den magnetischen Wirkungen des Stromes, deren Kenntniss wir daher hier vorgreifend voraussetzen müssen, wenn wir den Gegenstand nicht aus dem Zusammenhange getrennt an viel späterer Stelle vortragen wollen. Die Anzahl dieser oft mit sehr grossem Scharfsinne construirten Apparate ist ausserordentlich gross geworden. Die bekanntesten derselben sind die Systeme von Foucault, Serrin, Jaspar, Lontin, Fontaine, Gramme, Stöhrer, Schwerdt, v. Hefner-Alteneck (Differenzialregulator), Schuckert, Křižik (Pilsenerlampe), Gülcher, Kremenetzky u. s. w.

Wir können nicht annähernd daran denken, die Mehrzahl dieser Apparate hier zu beschreiben, müssen vielmehr auf die elektrotechnischen Lehrbücher verweisen. Wir wollen nur jene Regulatoren besprechen, welche in physikalischen Laboratorien häufig gebraucht werden und ausserdem die physikalisch interessanten Constructionsprincipien einiger anderer Typen erläutern.

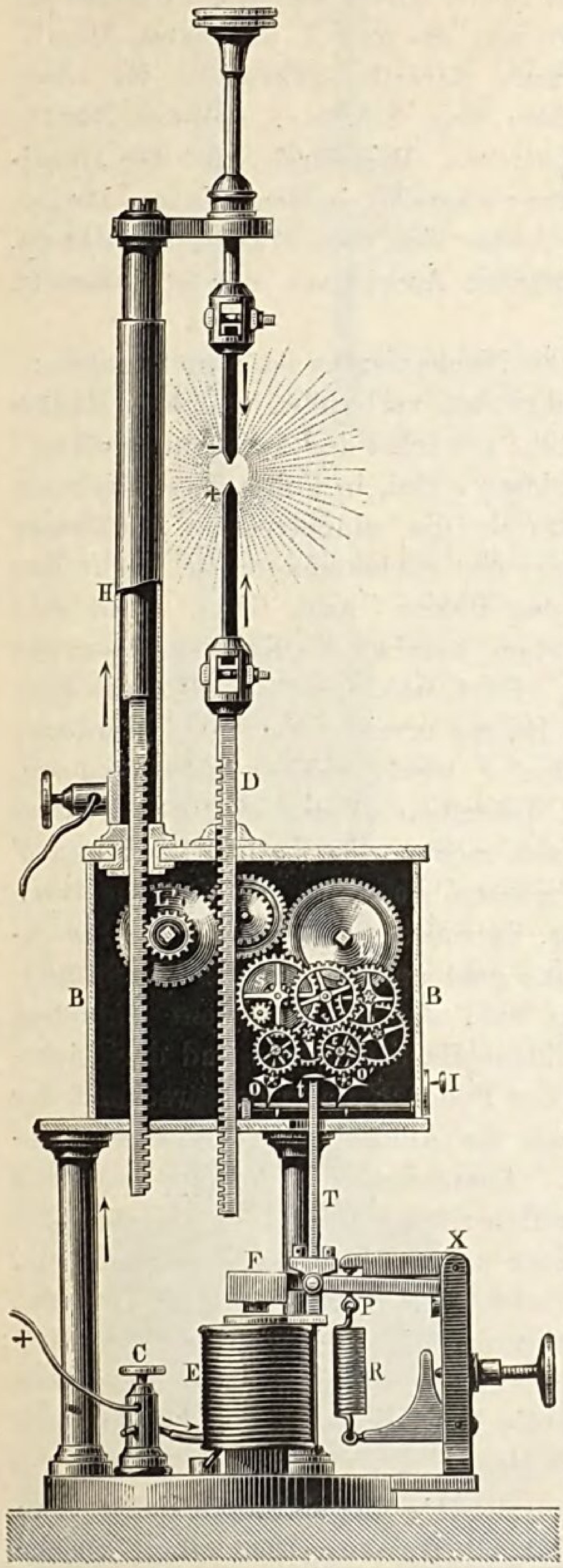
Der erste, allen Anforderungen entsprechende Bogenlichtregulator war jener von Foucault, welcher in der Werkstätte des seither verstorbenen berühmten Optikers Duboscq (Nachfolger: Pellat) in vorzüglicher Güte construirt und insbesondere als Lichtquelle in der Duboscq'schen Projectionslaterne viel gebraucht wird. Fig. 439 zeigt diesen Apparat im eröffneten Zustande.

Der positive Strom tritt bei der mit C bezeichneten Klemme ein, umkreist dann die Windungen des Elektromagnets E, gelangt dann durch die Metalltheile des Apparates an die Triebstange D und von dort an die Unterbrechungsstelle zwischen den Kohlenspitzen. Der negative

Strom wird direct der Säule H und von dort hinauf und herab der Unterbrechungsstelle zugeführt.

Um den etwas complicirten, aber sehr sinnreichen Mechanismus der Hauptsache nach zu verstehen, fasse man zunächst das Federhaus L' ins Auge, welches mit dem kleineren Zahnrade die linksseitige Zahnstange, also die obere Kohle, bewegt, mit dem grösseren Zahnrade die rechtsseitige Zahnstange, also die untere Kohlenspitze, in entgegengesetzter Weise in Bewegung setzt. Ueberdies erfolgt diese Bewegung wegen der ungleichen Raddurchmesser mit ungleicher Geschwindigkeit; die untere positive Kohlenspitze bewegt sich doppelt so schnell als die obere. Die Drehung des Federhauses L' wird ausserdem auf ein System von fünf Rädern übertragen, deren letztes o' einen sternförmig geformten Windfang bildet. So lange dieser Windfang nicht gehemmt wird, dreht sich das Rädersystem derartig, dass die Räder des Federhauses nach rechts rotiren, was eine Entfernung der Kohlenspitzen bewirken muss. Ein zweites Federhaus L ist in ähnlicher Weise mit einem Rädersystem verbunden, dessen letztes der Windfang o ist. Zwischen beiden Rädersystemen ist ein sogenanntes Satellitenrad (unter S) angebracht, welches mit denselben derart im Eingriffe steht, dass es gleichzeitig die Bewegung des einen Laufwerkes hemmt, wenn es die entgegengesetzte des anderen frei lässt. Zwischen den beiden Windflügelrädern o und o' befindet sich ein verticales oben mit einer querliegenden Arretirungsvorrichtung t versehenes Stäbchen, welches mit dem unteren Ende an dem eisernen Anker F des Elektromagnets befestigt ist und deshalb zugleich mit den Oscillationen

Fig. 439.



dieses Ankers um seinen Drehungspunkt hin und her oscillirt und dabei abwechselnd in die Flügel der Windräder o oder o' eingreift, so dass das eine gehemmt, das andere freigelassen wird.

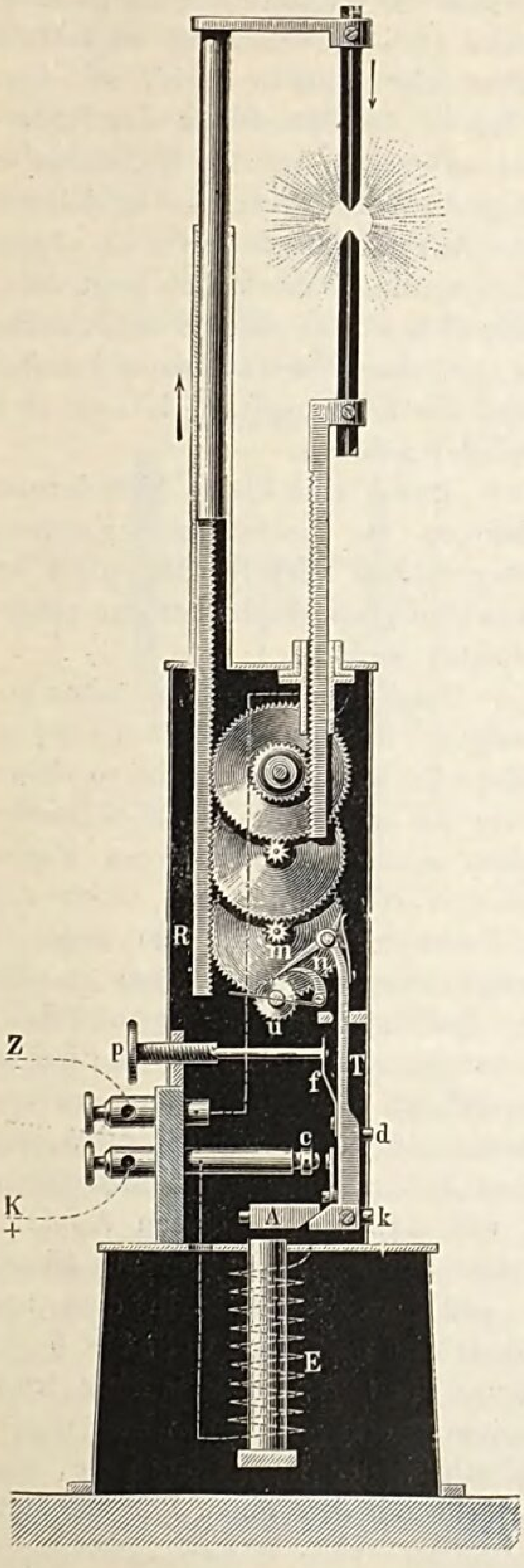
Der Anker selbst wird durch eine Feder R von dem Elektromagnet abgezogen, jedoch wirkt diese Feder nicht direct auf den Ankerhebel, sondern zunächst auf das Ende eines um die Axe X drehbaren Metallstückes, welches auf seiner Unterseite derartig gekrümmt ist, dass bei seinem Niedergange immer andere dem Stücke X nähere Punkte mit dem Ankerhebel in Berührung kommen. Hierdurch wird der Hebelarm, an welchem die Feder den Anker angreift, in dem Maasse länger, also ihre Wirkung kräftiger, als der Anker sich dem Magnetpole nähert, und es wird hierdurch dem zu plötzlichen Anwachsen der anziehenden Kraft des Magnets vorgebeugt.

Die Wirkungsweise dieses ganzen Mechanismus ist nun folgende:

Sind die Pole mit den Klemmschrauben verbunden und das Räderwerk aufgezogen und ausgelöst, so steht zunächst der Arretirungshaken t auf der rechten Seite, hemmt o' und lässt o frei, in Folge dessen müssen sich die Kohlenspitzen nähern. Durch die eingetretene Berührung kommt der Strom zu Stande, er belebt den Elektromagnet E, zieht den Anker F an und bringt hierdurch den Haken t nach links. Nun wird also o' frei und damit jenes Rädersystem, welches die Kohlenspitzen von einander entfernt. Der Lichtbogen bildet sich. Sobald aber die Entfernung der Kohlen einen gewissen Betrag erreicht hat, wird hierdurch die Stromstärke geschwächt, der Anker F weniger stark angezogen und die Feder R in den Stand gesetzt, denselben so weit abzuziehen, dass hierdurch der Haken t wiederum nach rechts geht, o frei lässt und o' hemmt. In Folge dieser Wirkung müssen sich also die Kohlenspitzen wieder nähern, aber nur sehr wenig, da sonst sofort wieder die Stromstärke steigt, der Haken t nach links geht und wieder das Windflügelrädchen o' frei lässt. Es muss also bald ein Gleichgewicht eintreten, bei welchem die Entfernung der Kohlenspitzen constant und der Lichtbogen ruhig bleibt. Die Spannung der Feder R kann entsprechend der Batteriestärke regulirt werden. Auch die Ankerdistanz kann bei manchen Exemplaren geändert werden. Ausserdem hat der Apparat noch die Einrichtung, dass man die Kohlenstifte während des Gebrauchs der Lampe unabhängig vom Räderwerk auf und ab bewegen kann, und zwar vermittelt eine (in der Figur nicht sichtbare, an der vorderen Aussenseite vor L' angebrachte) Schraube die gleichzeitige Bewegung beider Stifte, eine rückwärts gelegene Schraube die Bewegung des oberen Stiftes allein. Hierdurch ist man in die Lage versetzt, dem Lichtbogen von Anfang an eine beliebig hohe Stellung zu geben. Zur Erzeugung des elektrischen Lichtes mittelst Foucault's Regulator bediente man sich früher einer Batterie von 50 bis 60 Bunsen-Elementen, welche durch die Erfindung der Dynamomaschine und der Accumulatoren jetzt fast gänzlich verdrängt sind.

Von den in Deutschland construirten Kohlenlichtregulatoren wollen wir zuerst den Siemens-Halske'schen (System v. Hefner-Alteneck), unter dem Namen Contactlampe bekannten, in seinen Haupttheilen beschreiben. Fig. 440 giebt davon eine Abbildung.

Fig. 440.



Man beachte zunächst die beiden Polklemmen Z und K. Der positive Strom geht von K durch die isolirte Wand hindurch, dann hinunter und um den Elektromagnet E, dann auf das metallene Gestelle und von diesem auf den Träger des oberen Kohlenstiftes, durch den Lichtbogen zur unteren Kohlenspitze und zur isolirten Zahnstange derselben, endlich von dort zurück nach Z. Beide Zahnstangen sind mit einem Räderwerk derart verbunden, dass beide Spitzen in entgegengesetzter Richtung sich bewegen und zwar die positive Spitze mit doppelter Geschwindigkeit. Diese Bewegung wird durch das Uebergewicht des Trägers des oberen Stiftes hervorgebracht und durch ein Windrädchen bei u verlangsamt. Die Kohlenspitzen werden also durch die bisher beschriebene Vorrichtung einander genähert; es folgen nun die Vorrichtungen zur Entfernung derselben. Sobald der Strom durch die Berührung der Kohlenspitzen geschlossen wurde, zieht der Elektromagnet den Anker A an, bewegt hierdurch den um eine Axe bei k drehbaren Hebel T und bringt dadurch zwei Wirkungen hervor. Einmal wird hierdurch mittelst des Stössers m das Rädchen u, in dessen Zähne die Spitze des Stössers eingreift, zurückgedreht, welche Drehung auf dem Wege durch das übrige Räderwerk hindurch eine Entfernung der Kohlenspitzen bewirkt. Dann aber wird gleichzeitig bei c ein Contact geschlossen, wodurch dem

Strom ein kürzerer Weg neben der Spirale des Elektromagneten vorbei eröffnet wird. Der letztere verliert deshalb seine Kraft, der Hebel T weicht unter dem Drucke der Feder f nach rechts zurück und zieht den Stösser nach sich. Ist aber die eingetretene Entfernung der Kohlenspitzen noch nicht hinreichend gross gewesen, so wiederholt sich sofort dasselbe Spiel, der Hebel T oscillirt dann so oft hin und her, bis endlich durch den wiederholten Eingriff des Stössers in das Räderwerk die Entfernung der Kohlenspitzen so gross geworden ist, dass der dadurch bis auf eine bestimmte Grenze geschwächte Strom die Anziehung des Ankers A nicht mehr zu bewirken vermag. Von da ab liegt dann der Hebel T an dem Ruheanschlag d an, das Windrädchen wird frei und die Kohlenspitzen können sich wieder nähern.

Fig. 441.

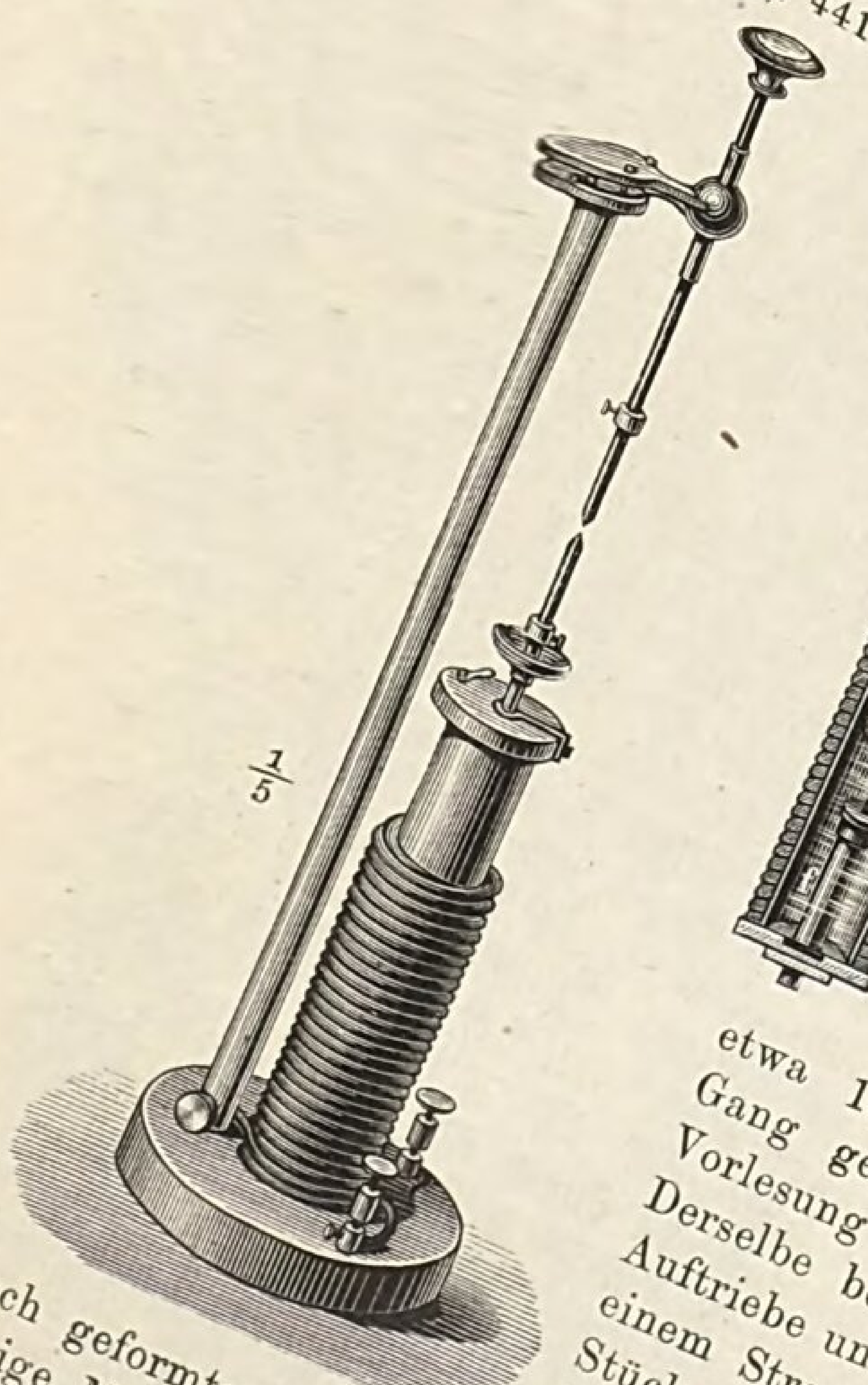


Fig. 442.



Durch eine kleine Abänderung können die beiden beschriebenen Regulatoren auch für die später zu erwähnenden Wechselströme eingerichtet werden.

Bescheideneren Ansprüchen genügt der Regulator von Stöhrer jun. Derselbe wirkt zwar nicht so sicher wie die vorigen, hat aber ausser dem sehr viel geringeren Preise den Vortheil, dass er schon mit etwa 18 Bunsen-Elementen so weit in Gang gesetzt werden kann, um in der Vorlesung das Bogenlicht zu demonstriren. Derselbe beruht auf der Eigenschaft der von einem Strome durchflossenen Spiralen, ein Stück Eisen in ihr Inneres hineinzuziehen. Fig. 441 und 442 zeigen diesen Apparat. Der Haupttheil desselben ist ein aus Eisenblech geformter Schwimmer a (Fig. 442), welcher sich in dem nur wenige Millimeter weiteren, mit Glycerin*) gefüllten Cylinder b auf und ab bewegen kann. — Der obere Theil des Schwimmers trägt eine Röhre c, in welche die Kohlenspitze d eingeschoben wird; unterhalb ist ein starker Kupferdraht befestigt, der in eine eiserne, mit Quecksilber gefüllte Röhre f taucht, welche mit dem einen Pole der Bat-

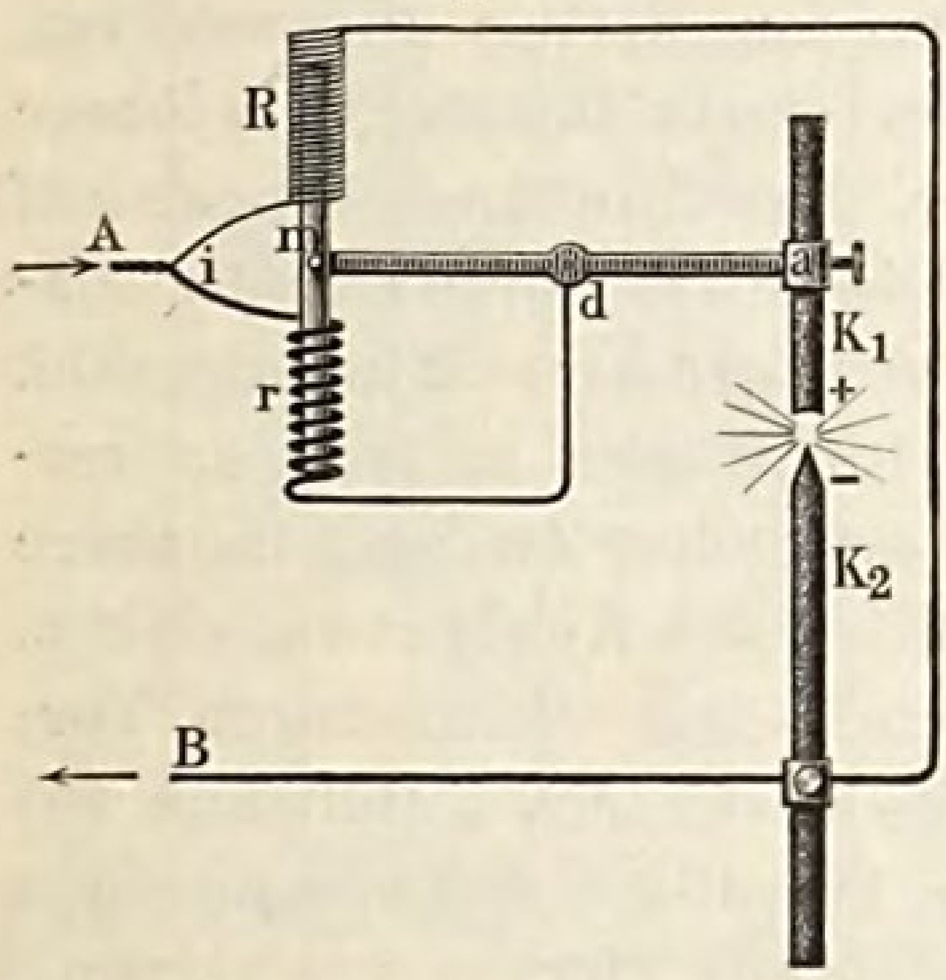
*) Statt des Glycerins, welches mit der Zeit fadenziehend wird, empfiehlt sich als dämpfende Flüssigkeit Vaselinöl (Paraff. liqu. Pharm. Germ. II). (V. v. Lang, Wien. Akad. Ber. 95, II [1887], S. 89.)

terie verbunden ist. Die Grösse des Schwimmers ist so gewählt, dass er sich nur langsam in der dicken Flüssigkeit nach oben bewegt. Durch Auflegen von kleinen Gewichten auf eine Schale unterhalb der Kohlenstange *d* kann man bewirken, dass die Kohlenspitze *d* gegen die obere Spitze *d'* nur mit einem sehr geringen Druck gepresst wird.

Es ist dies nöthig, wenn man schon bei wenigen Elementen ein ruhig brennendes Licht erhalten will. Ferner ist die den Cylinder *b* umgebende Kupferdrahtspirale *k* in den Stromkreis eingeschaltet. Beim Entstehen des Lichtbogens wird der Schwimmer *a* mit der Kohlenspitze *d* nach unten gezogen und die Länge des Lichtbogens je nach der Stärke des Stromes regulirt.

Je nach der Grösse des Apparates wird das Metallrohr, welches die obere Kohlenspitze trägt, entweder nur mit der Hand in einer Messingröhre oder durch eine Zahnstange mit Trieb verschoben, wobei der Apparat schon zu einfachen Projectionsversuchen, Darstellung des Spectrums etc. zu verwenden ist. Bei grösseren Apparaten wird das Metallrohr, wenn der Lichtbogen an einer festen Stelle verweilen soll, durch ein regulirbares Uhrwerk in dem Maasse, wie die Kohle verbrennt, nach unten bewegt. Ein ähnlicher Apparat, in welchem das gerade wegen seiner Zähigkeit empfehlenswerthe Glycerin durch Quecksilber ersetzt ist, ist von Ducretet*) beschrieben worden.

Fig. 443.



Eine besonders glückliche Lösung des Problems ist die von v. Hefner-Alteneck erfundene Differentiallampe, deren Princip aus der schematischen Fig. 443 zu ersehen ist. k_1 und k_2 sind die beiden Kohlenstäbchen. Der obere positive Stab k_1 ist in einer Hülse *a* derart befestigt, dass, wenn der um *d* drehbare Hebel *mda* sich auf der rechten Seite am tiefsten gesenkt hat, eine in der Hülse *a* befindliche Kuppelung den Kohlenstab auslässt, so dass er durch sein eigenes Gewicht herabsinken kann. Geht der Hebel wieder in die Höhe, so fasst er den Stab wieder und nimmt ihn mit in die Höhe. Am Ende *m* trägt derselbe Hebel einen verticalen Eisenstab, der mit seinen Enden je in eine Drahtspirale hineinragt. Die obere Spirale *R* besteht aus vielen Windungen dünnen Drahtes mit grossem Widerstande, die untere Spirale *r* aus wenigen Windungen dicken Drahtes, also von geringem Widerstande. Jede dieser Spiralen sucht, wenn sie von einem Strome durchflossen wird, den Eisenstab, dessen Gewicht am Hebel äquilibrirt ist, in sich hineinzuziehen. Der bei *A* zugeleitete Strom verzweigt sich in die beiden Spiralen, der obere Stromantheil wird, nachdem er die Spirale *R* durchflossen, zur Fassung der unteren Kohle k_2 und von dort nach *B* geleitet, der untere

*) Compt. rend. LXXVII, p. 1081.

weit überwiegende Stromantheil geht durch die Spirale r zum Hebel und von dort zur oberen Kohle, dann durch den Lichtbogen zur unteren Kohle und ebenfalls nach B.

Die Wirksamkeit des Regulators ist nun folgende: die Kohlen seien von Anfang an getrennt, der bei A eintretende Strom findet demnach den Weg über $r d k_1 k_2$ verschlossen, er geht daher ausschliesslich durch die obere Spirale nach B, zieht aber hierdurch das Eisen nach oben, also die Hülse a nach unten, welche nun die obere Kohle nach unten gleiten lässt. Sowie dieselbe die untere Kohle berührt, wird der Stromweg über $r d k_1 k_2$ eröffnet. Von da an bekommt die untere Spirale r fast den ganzen Strom, welcher der oberen entzogen wird. Das Eisen wird deshalb nach abwärts, die Hülse a nach aufwärts gezogen, der obere Kohlenstab dabei mitgenommen und der Lichtbogen dadurch hergestellt. Sowie aber derselbe die normale Länge angenommen hat, ist auch sein Widerstand bis auf einen bestimmten Betrag angewachsen, in Folge dessen die untere Spirale wiederum etwas weniger, die obere etwas mehr Strom erhält als früher, so zwar, dass ihre Anziehungen auf das Eisen sich das Gleichgewicht halten. Die obere Spirale ersetzt dabei die geringere Stromstärke durch die viel grössere Windungszahl. Wird durch das Abbrennen der Kohlen der Lichtbogen zu lang, so vermehrt sich der Widerstand in dem durch r gehenden Zweige; die obere Spirale zieht etwas stärker und lässt sofort die obere Kohle etwas sinken, bis die normale Bogenlänge wieder hergestellt ist. Wird durch Vorgänge ausserhalb der Lampe die Stromstärke verändert, so hat dies auf die relative Stärke der Stromzweige in den Spiralen der Lampe keinen Einfluss.

Nach dieser Erörterung des zu Grunde liegenden Principes wird es nun nicht schwierig sein, die erwähnte Kuppelung zwischen der Kohle k_1 und dem Hebel an der Durchschnittszeichnung der Lampe, Fig. 444, an der die unwesentlichen Theile weggelassen sind, zu erklären. Wir sehen in dieser Figur zunächst die Klemme k_1, welche den Strom zuführt, der sich bei i in die beiden Spiralen T und R theilt. Im Inneren der letzteren schwebt der Eisenstab SS am Ende des Hebels cc', der um den festen Punkt d drehbar ist. Die Zahnstange ZZ, welche die obere Kohle g trägt, ist nicht unmittelbar an dem Hebel cc' befestigt. Der letztere trägt vielmehr zunächst den Theil AAA, welcher mittelst einer Gelenkstange so befestigt ist, dass er sich parallel zu sich selbst auf und ab bewegen kann. Dieser Theil AAA trägt an linksseitigen Vorsprüngen die Axe eines Zahnrades r, den Drehpunkt E eines Pendels P, endlich den beweglichen Arm y, welcher mit einer Kerbe versehen ist, um das Pendel zu hemmen. Die Zahnstange greift in die Zähne des Zahnrades, kann aber nicht niedergleiten, so lange das Pendel gehemmt ist. Sobald jedoch der Hebelarm dc_1 in seine tiefste Lage kommt, stösst der Arm y an einen festen Stift, wird dadurch emporgedreht, das Pendel wird frei und die Zahnstange mit

der oberen Kohle kann niedergleiten, aber nur langsam, weil das Steigrad, das Echappement und das Pendel dadurch in Bewegung gesetzt werden müssen. Sobald der Hebelarm $d c_1$ steigt, wird der Theil *A* mit gehoben, der bewegliche Arm wird vom Stifte frei, fängt mit seiner Kerbe den Fortsatz des Pendels, wodurch dann das Echappement und das Rad gesperrt wird. Hierdurch wird die Zahnstange an den Theil *A* angekuppelt und mit emporgehoben.

Fig. 444.

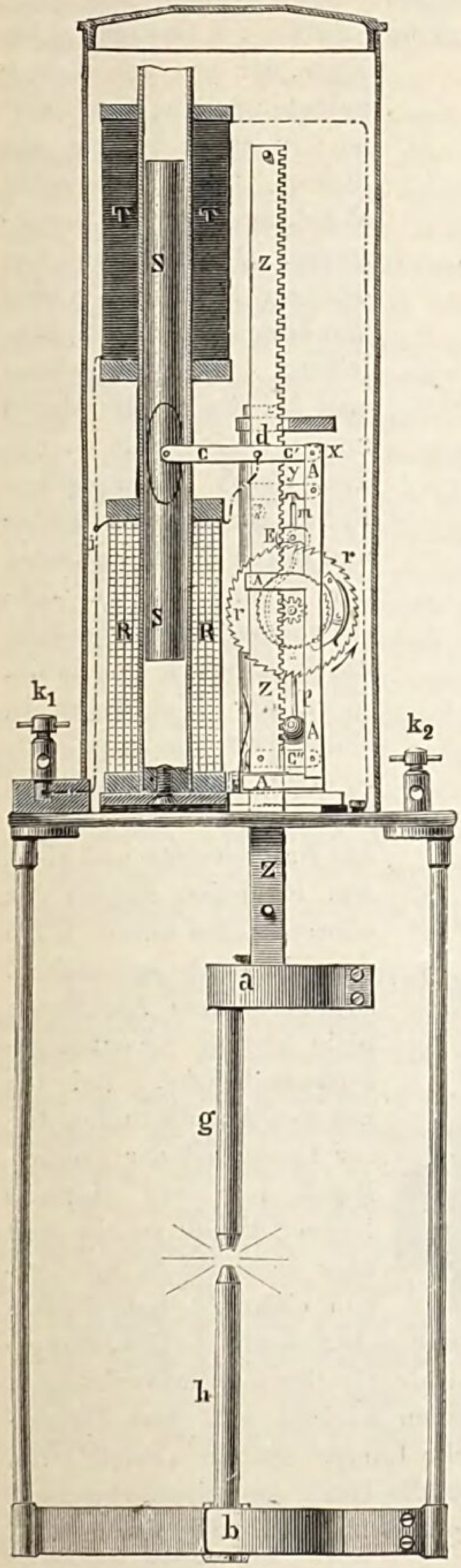
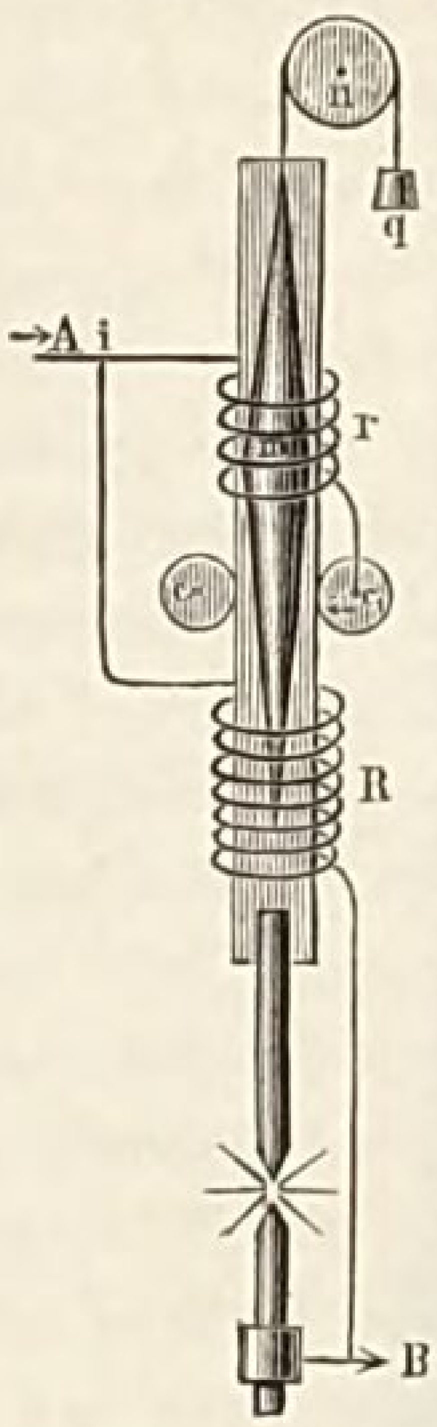


Fig. 445.

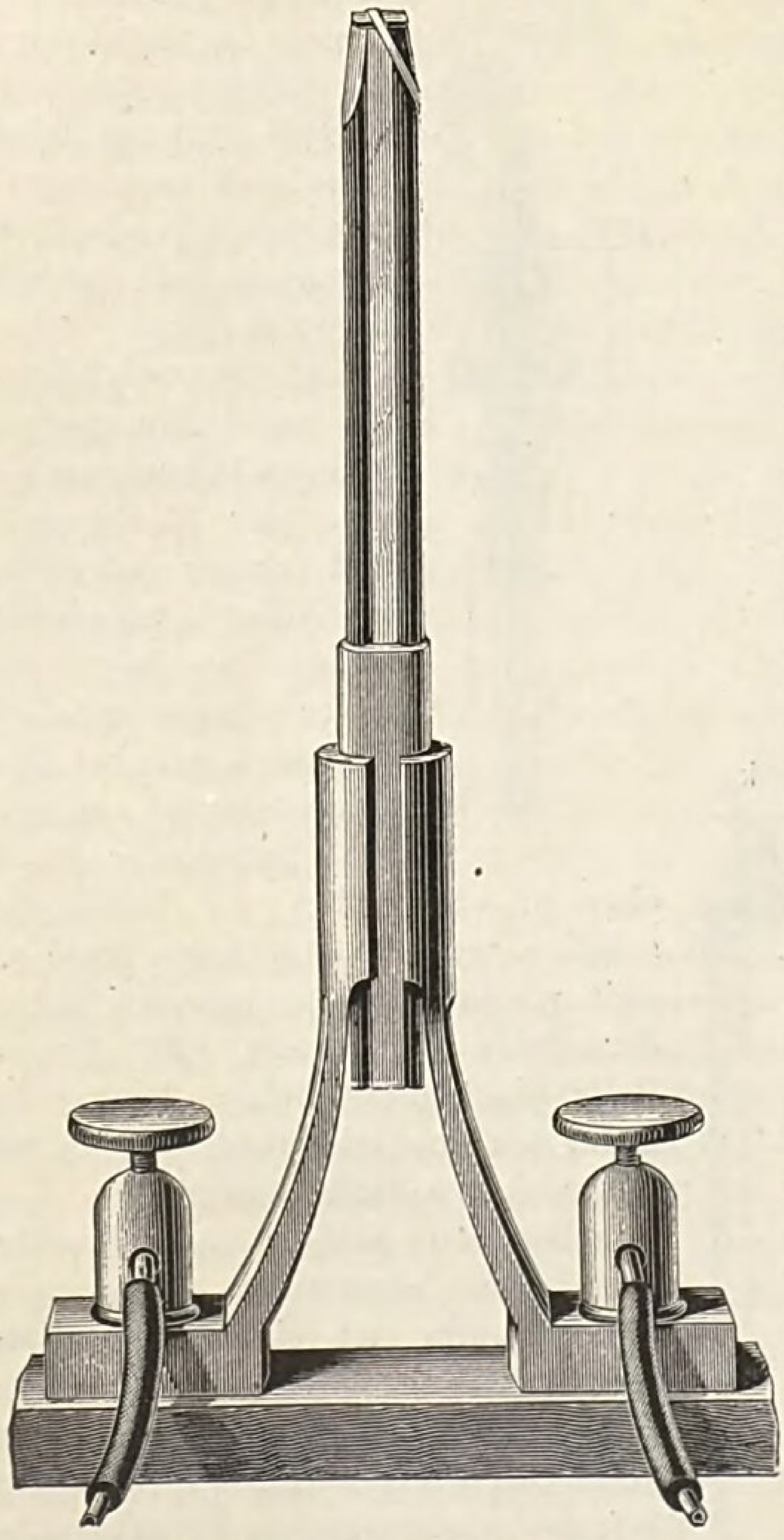


Bei dieser Construction wird die untere Kohle nicht nachgeschoben, der Lichtpunkt sinkt daher allmälig. Soll dies vermieden werden, so wird die untere Kohle ähnlich wie die Kerze bei den Wagenlaternen durch eine Spiralfeder nach oben in eine Röhre aus Metall geschoben, welche am oberen Ende so weit verengt ist, dass nur die Spitze der Kohle hervorragt. In diesem Falle dient diese Röhre gleichzeitig dazu, den Contact mit der Kohle an ihrem oberen Ende herzustellen.

Die von Křižik und Piette in Pilsen construirte sogenannte Pilsenerlampe ist eine Differentiallampe, wie jene von v. Hefner-Alteneck, unterscheidet sich aber durch die rationelle Form des von den Spiralen angezogenen Eisenkörpers. Wie wir hören werden, ist die Kraft, mit welcher ein cylindrischer Stab in eine Spirale gezogen wird, nicht in allen Lagen dieselbe. Man kann aber diese Kraft längs einer Strecke von der halben Stablänge constant

machen, wenn man sie durch stellenweise Verringerung des Eisenquerschnitts an jenen Stellen schwächt, wo sie sonst stärker ist. Die Fig. 445 (a. v. S.) erläutert dieses Princip. Der Eisenstab *n* in Form eines Doppelkegels ist im Inneren einer Röhre befestigt, welche zwischen Frictionsrollen $c\,c_1$ vertical beweglich aufgehängt und durch des Gewicht *q* am Ende der um die Rolle *n* gelegten Schnur äquilibrirt ist. *r* ist die Spirale aus dickem Draht und wenig Windungen für den Hauptstrom, *R* die Spirale aus dünnem Draht mit vielen Windungen für die Nebenleitung. Der Hauptstrom tritt bei *A* ein, geht durch *r* zur Frictionsrolle c_1, von dort durch die metallene Röhre zur oberen Kohle und durch den Lichtbogen zur Klemme bei *B*. Ein schwacher Nebenstrom geht durch *R* direct ebendahin. Wird der Lichtbogen in Folge Abbrennens grösser, so steigt die Intensität des Nebenstroms auf Kosten des Hauptstroms und zieht den Eisenkern sammt der oberen Kohle herab. Wäre der Eisenstab cylindrisch, so hätte diese Anziehung nicht überall die eben geforderte Stärke. Bei den neueren Ausführungen dieser Lampe ist der Doppelkegel in zwei einfache Kegel getrennt, welche statt über einander in zwei neben einander befindlichen Spiralen schweben. Auch enthält die Lampe automatische Ausschaltungsvorrichtungen eines Theils der Nebenspirale für Stromunterbrechungen.

Fig. 446.



Eine Art Combination des elektrischen Lichtes mit dem Drummond'schen Kalklicht ist die elektrische Lampe System „Soleil“ von Clerk und Bureau, bei welcher durch die Hitze des Lichtbogens ein Kalkblock zum Glühen und Leuchten gebracht wird. Hierdurch wird

an Intensität und Constanz des Lichtes gewonnen und der Strom entwickelt in Folge der höheren Temperatur leichter ein längeren Bogen, ohne zu erlöschen. Auf demselben Princip beruht eine von Rühlmann construirte Lampe. Die geringe Haltbarkeit der erhitzten Kalkstücke ist vor der Hand ein Nachtheil dieser Lampen, welche sich sonst durch sehr ruhiges Licht auszeichnen.

Auf ganz anderem und zwar viel einfacherem Wege hat der russische Ingenieur G. Jablochkoff die constante Entfernung der Kohlenpole zu erreichen versucht. Die nach ihm benannte „elektrische Kerze" besteht, wie Fig. 446 darstellt, einfach aus zwei parallel gestellten, durch eine isolirende Masse (Gyps, Porcellan) getrennten Kohlenstäbchen, welche an ihrer Spitze anfangs durch ein Stück eines halbleitenden Stoffes verbunden sind. Beim Einleiten des elektrischen Stromes wird der letztere entzündet und verbrannt, worauf sich der Lichtbogen herstellt. In dem Maasse, wie die Kohlenstäbchen verzehrt werden, wird in der grossen Hitze auch das dazwischen liegende Isolirungsmaterial geschmolzen und verflüchtigt, so dass also die elektrische Kerze nur allmälig herunter brennt. Soll dies jedoch mit Bezug auf beide Kohlenstäbchen symmetrisch und regelmässig erfolgen, so muss der Strom ein alternirender oder Wechselstrom sein, wie er durch passende Inductionsapparate, von denen später die Rede sein wird, erhalten werden kann.

Die späteren Vervollkommnungen dieses Systems beziehen sich auf automatisch wirkende Vorrichtungen zum Wiederanzünden resp. Neueinschalten frischer Kerzen. Jamin hat eine neue elektrische Kerze construirt, wobei keine isolirende Zwischenschicht vorkommt, da der Flammenbogen durch elektrische Fernwirkung von Seiten einer umgebenden Stromleitung an die Enden der Kohlenstäbe festgebannt wird. Alle diese Constructionen haben sich nicht im Gebrauch erhalten.

Die chemischen Wirkungen des elektrischen Stromes; scheinbare Zerlegung des Wassers. 155 Als Leiter der zweiten Classe haben wir seinerzeit alle jene bezeichnet, welche den Strom nur leiten, indem sie gleichzeitig eine chemische Veränderung (Zersetzung) erleiden. Es sind dies dieselben Leiter, welche, wie Volta erkannt hat, dem Gesetz der Spannungsreihe sich nicht unterordnen.

Nach einer von Faraday eingeführten, heute noch üblichen Bezeichnungsweise nennt man den Vorgang der Zersetzung eines Leiters durch den Strom Elektrolyse, den zerlegbaren Leiter Elektrolyt, die Eintrittsstelle des positiven Stromes Anode, die Austrittsstelle Kathode, beide Stellen zusammen Elektroden. Die Zersetzungsproducte nennt man Ionen, und zwar jenes Product, welches an der Anode ausgeschieden wird, Anion, das an der Kathode Kation. Unter Stromdichte versteht man das Verhältniss $\frac{J}{O}$ zwischen Stromstärke und Oberfläche der Elektrode.

Die erste galvanische Zersetzung, welche beobachtet wurde, war diejenige, welche beim Durchleiten des Stromes durch nicht ganz reines Wasser erfolgt.

Nachdem schon A. v. Humboldt 1797 beim Contact von Zink, Silber und Wasser ausser einer Oxydation des Zinks eine Entwickelung von Wasserstoff am Silber nachgewiesen hatte, war Ritter in Jena der erste, welcher schon im Frühjahr 1800, also vor Nicholson und Carlisle, denen diese Entdeckung gewöhnlich zugeschrieben wird, aus Wasser Sauerstoff und Wasserstoff entwickelt und abgesondert aufgefangen hat. Er machte auch zuerst den Versuch der Wiedervereinigung des Knallgases zu Wasser durch Entzündung mittelst des elektrischen Funkens. Auch entdeckte er schon damals die Zersetzung der Metallsalze und die Abscheidung der Metalle durch den Strom*).

Taucht man in das Wasser Poldrähte aus Kupfer, so wird am negativen Pole Wasserstoffgas in Bläschen frei, der am positiven Pole abgeschiedene Sauerstoff verbindet sich mit dem Kupfer zu Oxyd, so dass daselbst keine Gasentwickelung stattfindet. Ersetzt man aber den Kupferdraht durch Platin oder Gold, so wird auch das Sauerstoffgas in Freiheit gesetzt.

So glaubte man denn endlich, das Wasser direct in seine Elemente zerlegt zu haben. Erst in neuerer Zeit wurde erkannt, dass es in Wirklichkeit nur eine indirecte secundäre chemische Wirkung des Stromes ist, indem das reine Wasser selbst durch den Strom gar nicht zersetzt werden kann. Es sind stets die im Wasser gelösten, wenn auch oft nur spurenweise vorhandenen Salze oder salzartigen Säurehydrate, welche zersetzt werden und in weiter unten zu erklärender Weise zur indirecten Elektrolyse des Wassers Anlass geben. Wenn also dennoch von „Wasserzersetzung durch den Strom“ gesprochen wird, so hat man darunter eine indirecte Zersetzung zu verstehen.

Um beide Gase getrennt auffangen, messen und untersuchen zu können, hat man verschiedene Apparate construirt, die wir bereits in §. 119 als Voltameter beschrieben haben. Für Vorlesungsversuche eignen sich noch die beiden in Fig. 447 und 448 abgebildeten, von denen insbesondere der zweite von A. W. Hofmann construirte zu empfehlen ist. Die U-förmig gebogene, aus den beiden Schenkeln A und B bestehende Glasröhre communicirt rückwärts mit der Steigröhre C, welche zu dem höher gelegenen Reservoir R führt. Die Schenkel A und B sind durch Glashähne h, h' verschliessbar und münden nach oben in Röhrenspitzen, welche mittelst Kautschukröhrchen aufgesetzt werden. Bei p und p' sind Platindrähte eingeschmolzen, welche innen zu Platin-

*) E. Hoppe: Zur Geschichte des Volta'schen Spannungsgesetzes. Elektrotechn. Zeitschr. IX, S. 36. Diese uns erst während des Druckes zugekommene Abhandlung enthält auch interessante Mittheilungen über Prioritätsrechte Ritter's gegen Volta in Bezug auf die Entdeckung der Säule und des Spannungsgesetzes.

platten, aussen zu Polklemmen K, K' führen. Der Apparat wird mit angesäuertem Wasser gefüllt, indem man die Hähne öffnet, bis die Flüssigkeit alle Luft verdrängt hat und sie dann wieder schliesst. Nachdem der Strom eine hinlängliche Menge Gas entwickelt hat, kann man zunächst deren Volumverhältnisse nachweisen, wobei auf die ungleiche Höhe der drückenden Flüssigkeitssäule Rücksicht zu nehmen ist.

Das Volumen des an der negativen Polplatte aufsteigenden Wasserstoffgases ist doppelt so gross, als das Volumen des am positiven Pol frei werdenden Sauerstoffgases.

Fig. 447.

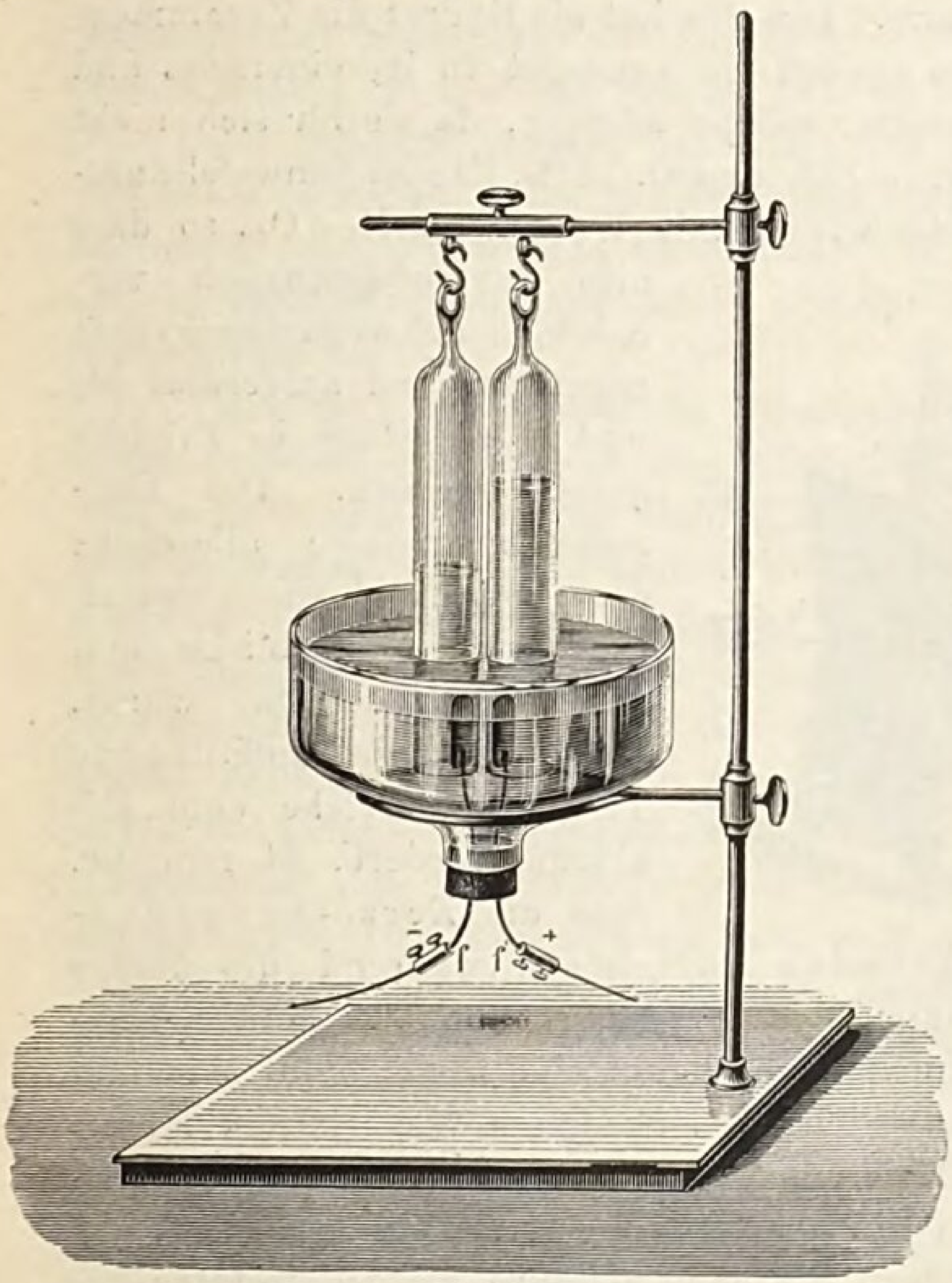
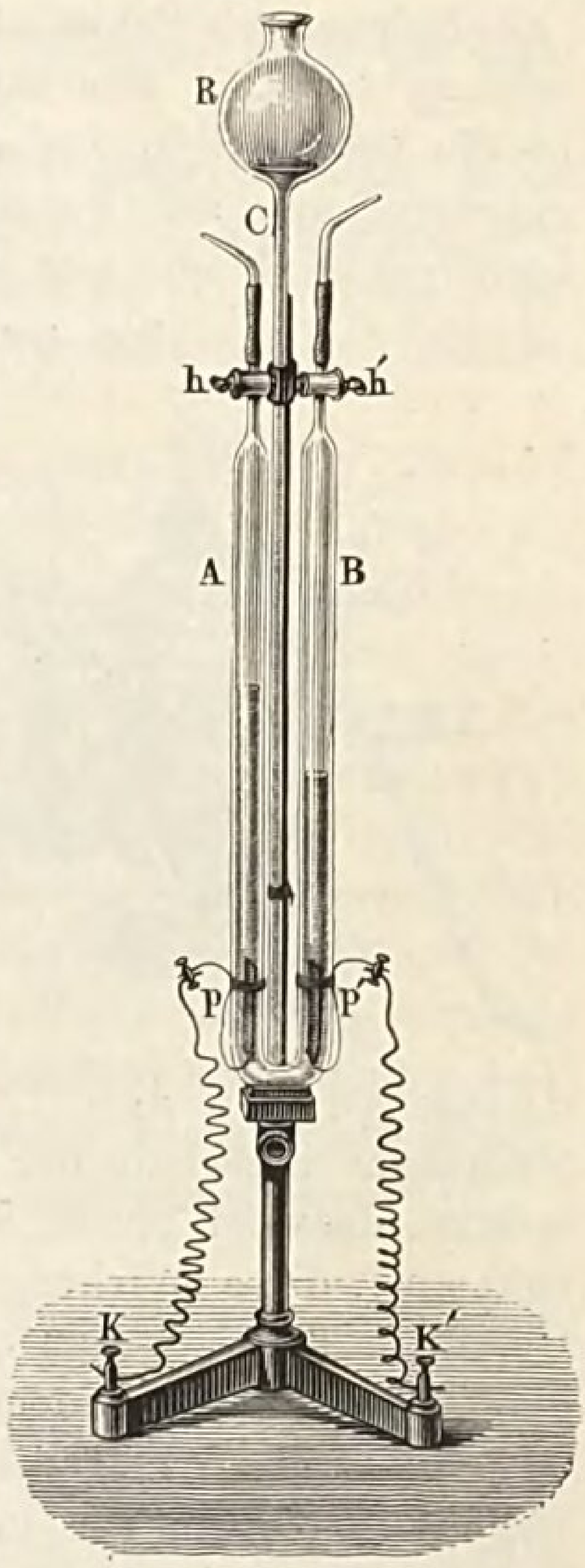


Fig. 448.



Um dann das Vorhandensein von Wasserstoff und Sauerstoff nachzuweisen, öffnet man die entsprechenden Hähne und zeigt, dass das eine brennt, das andere das Brennen (eines glimmenden Spans) unterhält.

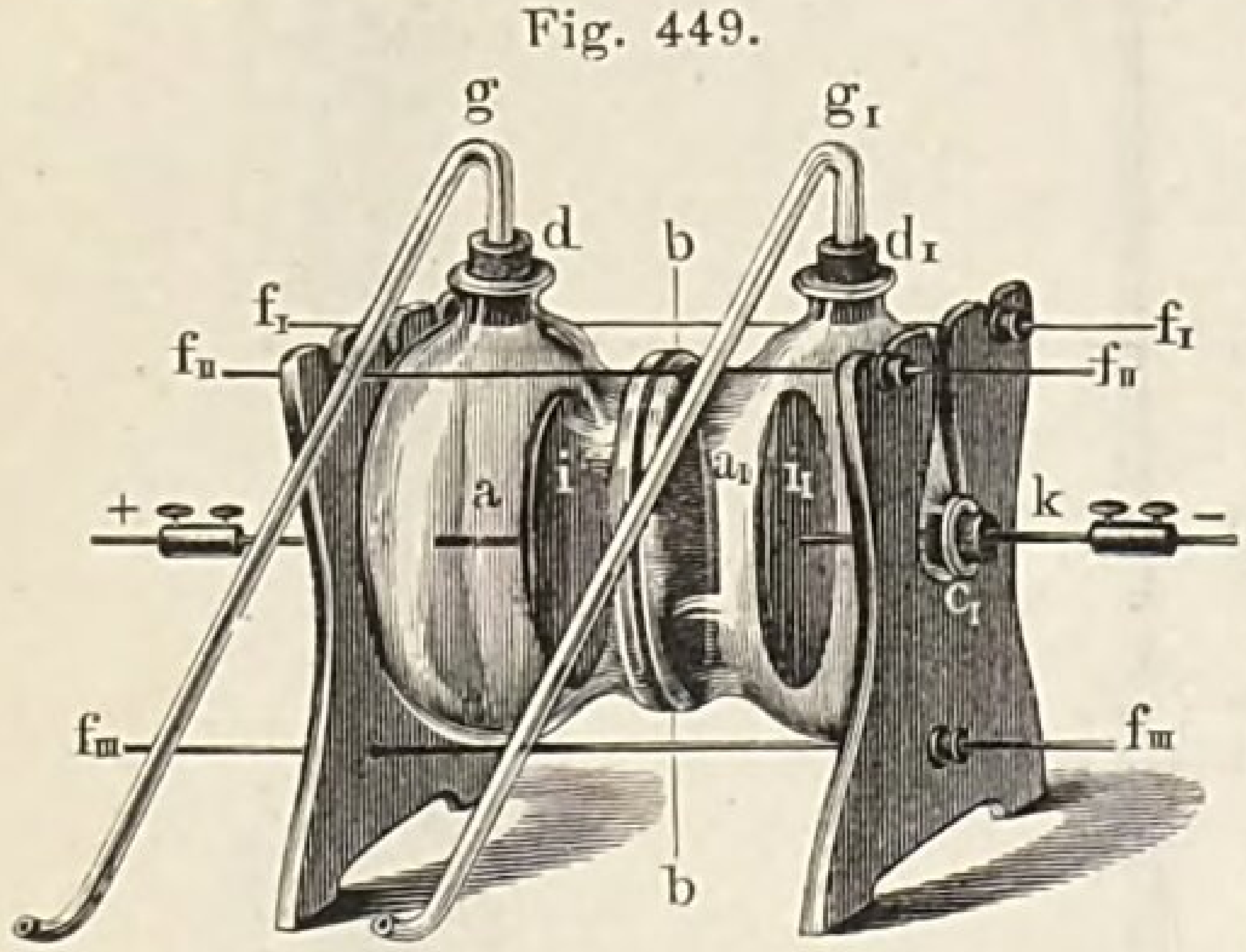
Um grössere Quantitäten von Wasserstoff und Sauerstoff auf galvanischem Wege zu erhalten, kann man sich des Apparates Fig. 449 (a. f. S.) bedienen. Bei bb ist zwischen die beiden grösseren mit dickerem abgeschliffenem Rande umgebenen Oeffnungen der Glasgefässe a und a_1 eine Wand von porösem Thon eingekittet; ausserdem werden aber die beiden Gefässe noch zwischen zwei Brettchen durch Schrauben festgehalten.

Jedes dieser Gefässe, welche mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt werden, hat oben einen Tubulus zur Aufnahme der Gasleitungsröhren, während die Zuleitungsdrähte für die Platinplatten *i* und i_1 durch zwei diametral gegenüberstehende Tubuli *c* (in der Figur nicht sichtbar) und c_1 eingeführt werden.

Nachdem durch die Versuche von F. Kohlrausch (§. 139) erwiesen ist, dass das ganz reine Wasser nicht zersetzt wird, so handelt es sich darum zu erklären, wie die Zersetzung von in Wasser gelösten Salzen oder Säuren zur Entwickelung von Wasserstoff und Sauerstoff, also zur indirecten Zersetzung des Wassers führe.

Nehmen wir Schwefelsäure. Dieselbe hat als Hydrat die Zusammensetzung H_2SO_4. Der Strom spaltet sie zunächst in H_2 einerseits und in die Gruppe SO_4 andererseits, welche letztere, da sie für sich nicht existiren kann, sofort zerfällt in SO_3 und O. SO_3, das ist Schwefelsäureanhydrid, verbindet sich sofort wieder mit Wasser zu H_2SO_4, so dass also das ursprünglich vorhandene Schwefelsäurehydrat regenerirt und ausserdem H_2 und O als Gase in Freiheit gesetzt werden. Das Endresultat ist also allerdings dasselbe, als ob die Schwefelsäure unzersetzt bliebe und das Wasser zersetzt würde. Die zunächst auffallendste Thatsache, welche eine Erklärung fordert, ist nun die, dass die Zersetzungsproducte nur an den Elektroden auftreten, während die übrige Strombahn innerhalb der Flüssigkeit unverändert bleibt. Man möchte meinen, dass der Strom, wenn ihm überhaupt eine zersetzende Wirkung zukommt, diese Wirkung auch überall auf seinem Wege leisten müsse. Um diese Thatsache zu erklären, hat Grothuss eine Hypothese vorgeschlagen, die wir jedoch dahin abgeändert vortragen wollen, dass wir eben nicht das Wasser, sondern die Schwefelsäure als Elektrolyten betrachten. Denken wir uns die beiden Elektroden — P und + P und zwischen ihnen in der Strombahn eine Reihe von H_2SO_4-Molecülen:

Fig. 449.



$$- P \quad \underset{+\ -}{H_2SO_4}\ \underset{+\ -}{H_2SO_4}\ \underset{+\ -}{H_2SO_4}\ \underset{+\ -}{H_2SO_4}\ \underset{+\ -}{H_2SO_4} \ + P \quad . \ . \quad 1)$$

Es wird nun angenommen, dass in jedem H_2SO_4-Molecüle der Wasserstoff positiv, der Bestandtheil SO_4 negativ elektrisch seien und unter dem influenzirenden Einflusse der Pole die in 1) angedeutete Orientirung annehmen. Der negative Pol — P zieht das anliegende + H_2 an sich, welches sofort als Gas in Freiheit gesetzt wird, ebenso zieht + P das anliegende — SO_4 an sich, welches in SO_3 und O zerfällt, welches letz-

tere als Gas frei wird. Die negative Elektrode wirkt dagegen abstossend auf den negativen Bestandtheil — SO_4, welcher nun dem zweiten Schwefelsäuremolecüle sein + H_2 entreisst und sich damit zu SO_4H_2 verbindet; das Analoge erfolgt von Seiten des + H_2 am + Pole gegenüber dem — SO_4. In dieser Weise fortschreitend, kommt es im Laufe der Strombahn nur zum Austausche der Bestandtheile unter Wiederbildung gleich zusammengesetzter Molecüle, während an den Elektroden je ein Bestandtheil frei wird, wie das Schema 2) zeigt:

$$- P \; \overset{}{\underset{+}{H_2}} \; \underset{-}{SO_4} \underset{+}{H_2} \; \underset{-}{SO_4} \underset{+}{H_2} \; \underset{-}{SO_4} \underset{+}{H_2} \; \underset{-}{SO_4} \underset{+}{H_2} \; \underset{-}{SO_4} + P \quad . \; . \quad 2)$$

Hierauf folgt neuerdings die Orientirung der Molecüle nach den Elektroden wie bei 1) und der Process geht so fort.

Diese Erklärungsweise befriedigt aus mehrfachen Gründen nicht, wir haben sie aber deshalb nicht übergangen, weil sie noch heute sehr verbreitet ist. Wir werden an späterer Stelle auf die Theorie der Elektrolyse ausführlich zurückkommen und vor der Hand nur das Thatsächliche mittheilen.

Wenn man das Wasser im Zersetzungsapparate mit viel Schwefelsäure versetzt, so bemerkt man häufig, dass das Volumverhältniss des Wasserstoffs zum Sauerstoff nicht 2 : 1 ist, sondern dass weniger Sauerstoff entwickelt wird. Es kommt dies daher, dass ein Theil des Sauerstoffs zu Ozon verdichtet wird. In diesem Falle tritt dann an der Kathode immer auch Wasserstoffsuperoxyd auf, wodurch ebenfalls Sauerstoff in Anspruch genommen wird. Hat man Anode und Kathode durch eine poröse Zelle getrennt, so kann man nachher die Anwesenheit von Ozon durch Jodkalium und Stärkekleister, welcher blau gefärbt wird, und die Anwesenheit des Wasserstoffsuperoxyds durch etwas mit Salpetersäure angesäuertes übermangansaures Kali, welches entfärbt wird, nachweisen.

Bei schwacher Ansäuerung und Anwendung hinlänglich grosser Elektrodenflächen tritt kein merklicher Verlust an Sauerstoffgas auf.

Elektrolyse der Alkalien. Für die Entwickelung der Chemie 156
von grösster Wichtigkeit war die im Jahre 1807 von Davy mit Hülfe der Säule gemachte Entdeckung der Zerlegbarkeit der Alkalien. Davy fand nämlich, dass die Alkalien und Erden, welche man für einfache Körper gehalten hatte, unter der Einwirkung des galvanischen Stromes in Sauerstoff und ein bis dahin unbekanntes Metall zerfallen. Das Metall des Kalis nannte er Kalium, das des Natrons wurde Natrium genannt.

Kaum waren die ersten unvollständigen Nachrichten über diese Entdeckung verbreitet worden, als man an mehreren Orten den Versuch mit Erfolg wiederholte. Das Wichtigste über die Versuche findet man im 28. Bande von Gilbert's Annalen. Ermann und Simon in Berlin, Jacquin in Wien publicirten alsbald Näheres über die Art und Weise, wie ihnen die galvanische Zerlegung des Kalis und des Natrons geglückt war, und den Bemühungen von Gay-Lussac und Thénard

gelang auch alsbald die Zerlegung dieser Körper ohne Anwendung des galvanischen Stromes auf rein chemischem Wege.

Folgendes ist das Wesentliche des Versuchs: wenn man ein Stückchen Aetzkali, KHO, ebenso feucht, wie es durch Anhauchen wird, zwischen die Pole einer kräftigen Säule bringt, indem man es etwa auf eine Platinplatte legt, die mit dem positiven Pole der Säule verbunden ist und es oben mit einem, den negativen Pol der Säule bildenden Platindrahte berührt, so findet nach kurzer Zeit eine oberflächliche Schmelzung statt; an der positiven Platinplatte entwickeln sich Bläschen von Sauerstoffgas, an dem negativen Platindraht aber erscheinen ausser einzelnen Bläschen von Wasserstoffgas noch kleine Metallkügelchen von silberweisser Farbe und nicht zu verkennendem Metallglanz, die anfänglich flüssig scheinen wie Quecksilber, und sich oft zu grösseren vereinigen. Alsbald aber werden die Kügelchen fest und verlieren durch die Berührung mit der umgebenden Luft ihren Metallglanz. Zieht man, nachdem mehrere solcher Kügelchen sich gebildet haben, den negativen Poldraht von dem Aetzkali zurück, so erstarrt alsbald das noch an dem Draht anhängende Aetzkali und in der erstarrten Masse sind dann einzelne Kaliumkügelchen zerstreut. Taucht man den Draht mit den anhängenden Kügelchen in Wasser, so detoniren sie, indem sie sich auf Kosten des Sauerstoffs des Wassers oxydiren, wobei Wasserstoffgas frei wird, welches sogleich wieder verbrennt.

Mit Aetznatron gelingt der Versuch leichter, denn die Natriumkügelchen oxydiren sich nicht ganz so leicht, wie die Kaliumkügelchen, wenn man aber den negativen Poldraht mit den anhaftenden Natriumkügelchen in Wasser taucht, so erfolgt keine Detonation, sondern nur eine lebhafte Entwickelung von Wasserstoffbläschen, indem das Natrium sich wieder zu Natron oxydirt.

Wenn sich etwas grössere Kügelchen von Kalium oder Natrium am negativen Poldraht angesetzt haben, so kann man sie vor fernerer Oxydation dadurch schützen, dass man den Draht rasch in rectificirtes Steinöl (eine sauerstofffreie Flüssigkeit) eintaucht und die Kügelchen vom Drahte ablöst.

In der Regel verbreiten sich zahlreiche, äusserst feine Metallkügelchen, von dem negativen Poldrahte sich ablösend, in der geschmolzenen Masse des Alkalis, welches dadurch etwas geschwärzt wird. Wirft man die erstarrte Masse dann in Wasser, so erfolgt eine lebhafte Wasserzersetzung.

Wenn die Masse des Alkalis vollständiger geschmolzen und dadurch der Strom kräftiger geworden ist, so erfolgt die Reoxydation des reducirten Alkalimetalls schon in der Masse meist unter Feuererscheinung. Wenn sich etwas grössere Kügelchen des Alkalimetalls gebildet haben, so ist dann die Verbrennung öfters von einer Detonation begleitet.

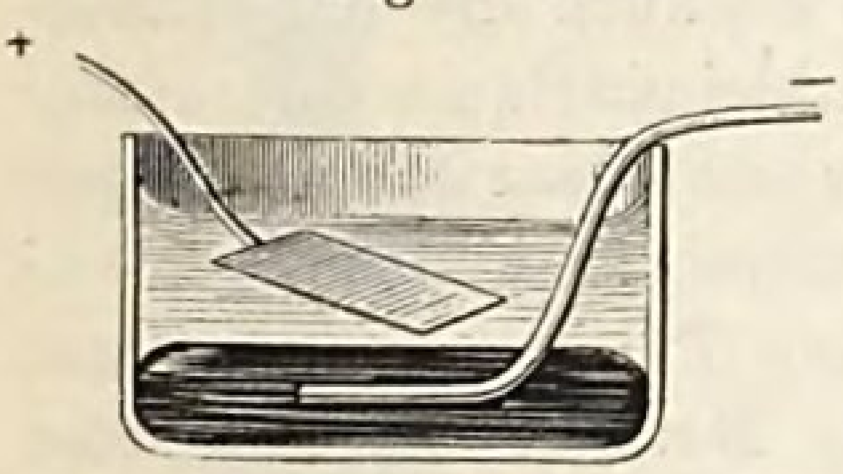
Davy wandte zu seinen Versuchen einen Trogapparat von 250 Plattenpaaren an. Ermann und Simon gebrauchten eine Säule von 60

Plattenpaaren, deren jedes 21 cm Durchmesser hatte. Eine Säule von 10 bis 12 Bunsen'schen Bechern oder Accumulatoren genügt zu diesem Versuche vollkommen.

Seebeck hat ein Mittel angegeben, um das durch die Säule ausgeschiedene Kalium sicherer zu sammeln. In ein Stück kaustischen Kalis, welches zersetzt werden soll, wird eine Höhlung gemacht und Quecksilber in dieselbe gegossen. Das Kali wird dann auf ein mit dem positiven Pole der Säule in Verbindung stehendes Platinstück gelegt, das negative Drahtende aber in das Quecksilber getaucht. Alsbald geht die Zersetzung vor sich; Sauerstoff wird am Platin frei, das Kalium aber verbindet sich mit dem Quecksilber zu einem ziemlich beständigen Amalgam.

Am leichtesten erhält man das Amalgam der Alkalimetalle auf folgende, Fig. 450 dargestellte Weise. Auf den Boden eines Glasgefässes wird Quecksilber gegossen und in dasselbe ein Platindraht eingetaucht, welcher bis auf den unteren horizontal umgebogenen Theil mit Siegellack überzogen ist. Dieser Draht wird mit dem negativen Pol einer Säule (von etwa sechs bis zehn Zinkkohlenbechern) in Verbindung gebracht. Auf das Quecksilber giesst man nun die concentrirte alkalische Lösung und taucht in dieselbe eine mit dem positiven Pole einer Säule verbundene Platinplatte. Die Zersetzung geht sogleich vor sich und das Kalium wird von dem Quecksilber unter beträchtlicher Temperaturerhöhung aufgenommen. Dieses Amalgam erstarrt beim Erkalten. Durch Abdestilliren des Quecksilbers im luftfreien Raume kann daraus das Kalium gewonnen werden.

Fig. 450.



Nachdem man die Alkalien als Metalloxyde erkannt hatte, war kein Zweifel mehr, dass auch die alkalischen Erden, Kalkerde, Baryterde, Bittererde (Magnesia) etc., oxydirte Metalle seien.

Davy erhielt im Jahre 1808 das metallische Radical der Baryterde, das Baryum, indem er aus Baryterde oder kohlensaurem Baryt und Wasser einen Teig bildete, und diesen auf ein mit dem positiven Pole der Säule verbundenes Platinblech legte, sodann in eine Vertiefung im Teig etwas Quecksilber goss und in dieses den negativen Pol der Säule eintauchte. — Das so erhaltene Amalgam wurde durch Erhitzen in einer gebogenen und mit Steinöldampf gefüllten Röhre von Quecksilber befreit.

Elektrolyse geschmolzener Chlormetalle. Wenn man die Chlormetalle im geschmolzenen Zustande dem Strom aussetzt, so werden sie gleichfalls zersetzt und zwar in der Art, dass das Chlor am positiven, das Metall am negativen Pole ausgeschieden wird. Faraday stellte den Versuch in der Weise an, dass er das Chlormetall, z. B. Chlor- 157

silber oder Chlorblei, auf einer Glasplatte oder in einer U-förmig gebogenen Glasröhre durch eine Weingeistlampe schmolz und dann die Poldrähte in das geschmolzene Salz eintauchte. Wenn das am positiven Pol austretende Chlorgas die Substanz dieses Poles angreift, so kann es nicht als Gas entweichen, sondern es verbindet sich mit dem Metall. Taucht man z. B. silberne Poldrähte in geschmolzenes Chlorsilber, so wird der positive Pol in dem Maasse aufgelöst, in welchem sich metallisches Silber an dem anderen Poldrahte ansetzt.

Bunsen hat auch die leicht oxydirbaren Metalle der Alkalien und Erden aus ihren geschmolzenen Chlorverbindungen galvanisch abgeschieden. — Er hat gezeigt, dass man in den meisten Fällen nur durch grosse Stromdichtigkeit am negativen Pole zum Ziele gelangt; um aber den Strom am negativen Pole möglichst zusammenzudrängen, ist es nothwendig, die Oberfläche des negativen Poles möglichst zu reduciren, was Bunsen dadurch erreicht, dass er als negativen Pol nicht Platinplatten, sondern Platin- oder Eisendrähte anwandte.

Der Einfluss der Stromdichtigkeit am negativen Pole ist leicht zu verstehen. Wenn ein kräftiger Strom am negativen Pole auf einen kleinen Querschnitt zusammengedrängt ist, so ist auch die der Stromstärke entsprechende Metallreduction auf einen kleinen Raum zusammengedrängt, so dass die dicht neben einander ausgeschiedenen Metallkügelchen sich eher zu etwas grösseren Stücken vereinigen können. Wenn dagegen bei gleicher Stromstärke die negative Polplatte eine grosse Oberfläche hat, so wird die gleiche reducirte Metallmenge auf einen grösseren Raum ausgebreitet, sie kann also überall nur in feinst vertheiltem Zustande auftreten, wodurch eine Reoxydation begünstigt und die Vereinigung zu etwas grösseren zusammenhängenden Stücken erschwert wird.

Unter Bunsen's Leitung hat Matthiessen mehrere derartige Reductionen ausgeführt. Die Darstellung des Calciums gelang am besten auf folgende Weise: Ein Gemisch von zwei Aequivalenten Chlorcalcium mit einem Aequivalent Chlorstrontium und Chlorammonium wird in einem kleinen Porcellantiegel geschmolzen und in die geschmolzene Masse ein Bunsen'sches Kohlenstück als positiver Pol eingetaucht, während als negativer Pol der ungefähr aus sechs Zinkkohlenbechern bestehenden Säule ein an einem dickeren Drahte befestigter und nur 4 mm tief in die Flüssigkeit eingetauchter Klaviersaitendraht dient. Die Flamme unter dem Tiegel wird so regulirt, dass die Masse um den negativen Poldraht herum oben etwas erstarrt und eine kleine schützende Kruste bildet. Ungefähr alle drei Minuten wird der Draht sammt der anhängenden Kruste herausgenommen, um unter Steinöl die daran sitzenden Calciumkörnchen abzusondern.

Das so dargestellte Calcium hat die Farbe des Glockenmetalls, zeigt, frisch angefeilt, ausgezeichneten Glanz, ist sehr ductil, aber in ausgehämmerten Stücken spröde. In vollkommen trockener Luft erhält

sich das Calcium oft Tage lang ohne anzulaufen, in feuchter Luft überzieht es sich aber bald mit einer grauen Schicht und verwandelt sich allmälig in Kalkhydrat.

Auf dieselbe Weise lässt sich auch Natrium aus geschmolzenem Kochsalz darstellen und Lithium aus einer geschmolzenen Masse von Chlorlithium reduciren; die am negativen Eisendraht sich bildende Lithiumkugel kann man, da sie durch eine Schicht geschmolzenen Chlorlithiums vor Oxydation geschützt bleibt, mittelst eines kleinen löffelförmigen Spatels sammt dem Eisendraht herausnehmen und unter Steinöl vom Draht ablösen.

Das Lithium ist silberweiss, auf der frischen Schnittfläche läuft es aber sofort gelblich an; sein specifisches Gewicht ist als Mittel aus zwei Bestimmungen 0,594. Das Lithium ist sehr zähe und lässt sich zu Draht ausziehen, seine Festigkeit ist aber geringer als die des Bleies.

Fig. 451.

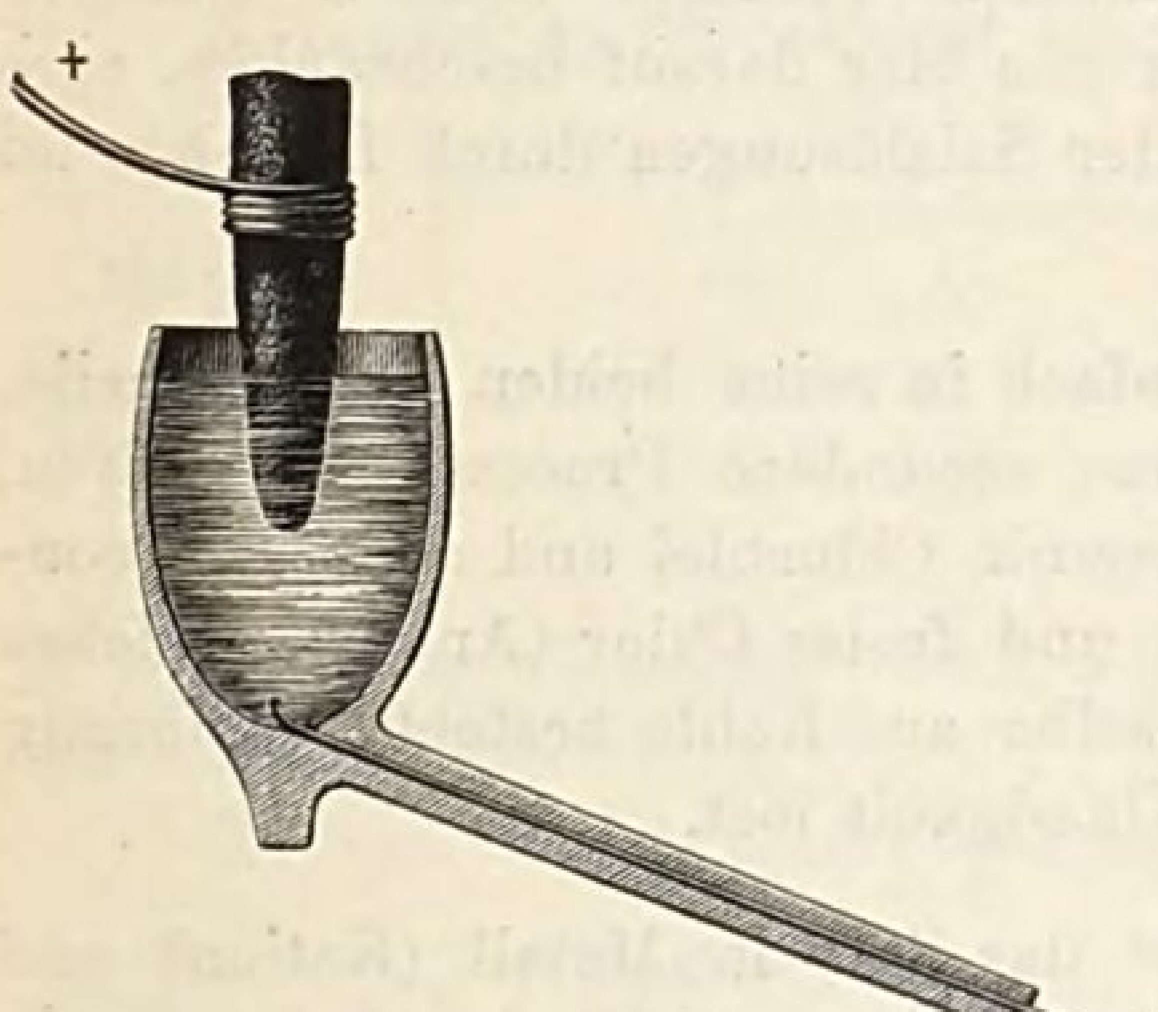
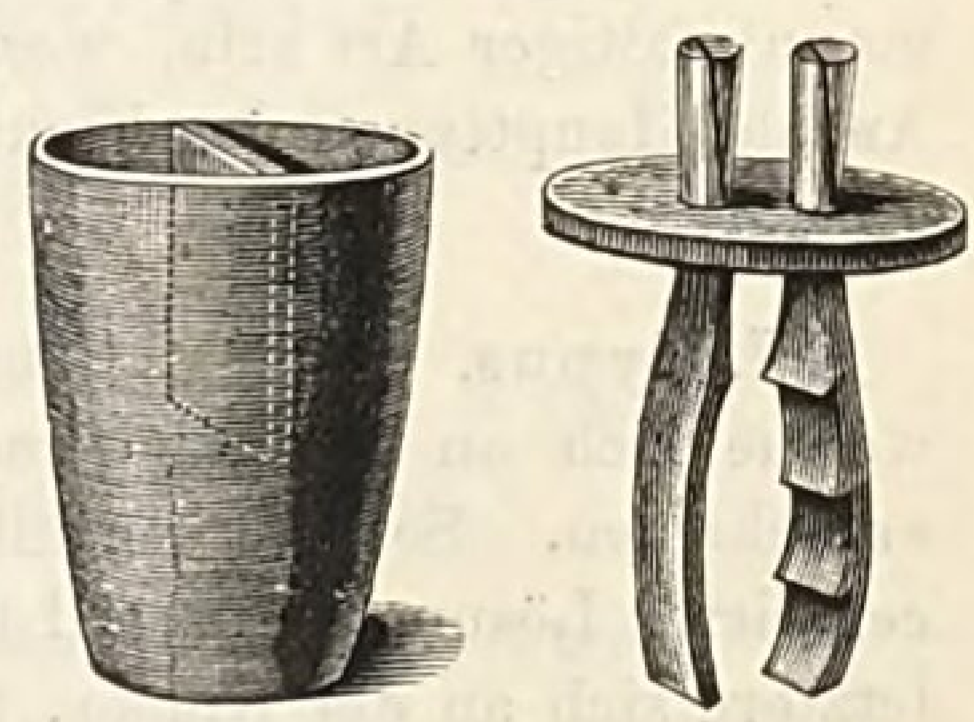


Fig. 452.



Magnesium wird am leichtesten aus einer Mischung von nahezu gleichem Gewichte Chlorkalium und Chlormagnesium erhalten. Da das Magnesium specifisch schwerer ist als die geschmolzene Mischung, so kann man den negativen Poldraht im unteren Ende der Zerlegungszelle anbringen, was am leichtesten auf folgende Weise bewerkstelligt wird.

Man steckt durch die Röhre einer irdenen Pfeife einen Eisendraht so in dieselbe ein, dass er noch 2 bis 4 mm in den Kopf hineinragt, wie Fig. 451 zeigt. Das in den Pfeifenkopf eingefüllte Gemisch wird geschmolzen und dann in dasselbe ein mit dem positiven Pole der Säule verbundenes Stück Kohle eingetaucht, während der Eisendraht mit dem negativen Pole der Säule in Verbindung gebracht wird.

An dem Kohlenpole findet eine lebhafte Chlorentwickelung statt. Nachdem der Strom ungefähr eine halbe Stunde lang durch die geschmolzene Masse hindurch geleitet worden ist, wird er unterbrochen und der Pfeifenkopf zerschlagen; man findet dann zahlreiche ziemlich grosse Körnchen von Magnesium in der erstarrten Salzmasse.

Um noch grössere Mengen von Magnesium zu erhalten, muss man die entstandenen Kügelchen am Aufsteigen verhindern. Man erreicht

dies durch einen Kunstgriff von **Bunsen**, indem man als Kathode ein sägeförmig eingeschnittenes Kohlenstück, Fig. 452 (a. v. S.), verwendet, in dessen einspringenden Winkeln sich die Metallkügelchen beim Aufsteigen fangen. Dieselben werden erst nach dem Erkalten aus der zerschlagenen Masse ausgelöst.

Gemenge verschiedener Chlormetalle werden zu diesen Versuchen vorzüglich deshalb angewandt, weil sie schon bei einer niedrigeren Temperatur schmelzen als die einzelnen Chlormetalle.

158 **Elektrolyse gelöster Salze.** Bei der Elektrolyse von Salzlösungen werden zunächst die Salze in derselben Weise zersetzt wie im geschmolzenen Zustande, indem an der Kathode das Metall, an der Anode der Rest der Elemente (Säure und Sauerstoff) abgeschieden werden. In der Regel kommt es aber nicht zu einem Freiwerden dieser Jonen, sondern es treten in Folge secundärer Processe andere indirecte Zersetzungsproducte auf. Die secundären Processe können ziemlich mannigfaltiger Art sein, weshalb wir uns hier darauf beschränken, eine Anzahl Haupttypen der Elektrolyse der Salzlösungen durch Beispiele zu erläutern:

I. Typus. Das Salz zerfällt einfach in seine beiden Bestandtheile, welche sich an den Elektroden, ohne secundäre Processe einzuleiten, ausscheiden. So z. B. zerfallen Chlorzink, Chlorblei und andere in concentrirter Lösung in Metall (Kation) und freies Chlor (Anion), welches letztere sich an der Anode, falls dieselbe aus Kohle besteht, gasförmig ausscheidet, theilweise auch in der Flüssigkeit löst.

II. Typus. Der Strom zersetzt das Salz in Metall (Kation) und in den Rest der Elemente (Anion). Das letztere wirkt chemisch auf das lösende Wasser und zerfällt hierbei in Säurehydrat und Sauerstoff.

Beispiel: Schwefelsaures Kupferoxyd zwischen Platinelektroden:

Stromwirkung	Kation	$CuSO_4$	Anion
	Cu		SO_4
Secundärer Process	—		$SO_4 + H_2O$
			$= H_2SO_4 + O.$

Man kann sich vorstellen, dass SO_4 zuerst in SO_3 und O zerfalle und dann SO_3 mit H_2O in Verbindung trete. Ebenso zerfallen viele andere Salze der Sauerstoffsäuren, deren Metalle nicht für sich allein das Wasser zersetzen.

III. Typus. Der Strom zersetzt das Salz normal in Metall und den Rest, die beiden entstandenen Jonen zersetzen hierauf das Lösungsmittel.

Beispiel: Schwefelsaures Natron zwischen Platinelektroden:

	Kation	Na_2SO_4	Anion
Stromwirkung	Na_2		SO_4
Secundäre Processe	$Na_2 + 2H_2O$ $= H_2 + 2(NaHO)$		$SO_4 + H_2O$ $= H_2SO_4 + O.$

Wasserstoff und Sauerstoff werden als Gase frei, Natronhydrat und Schwefelsäurehydrat lösen sich in der Nähe der Elektroden.

Dieselbe oder analoge Zerlegung erleiden alle schwefelsauren und salpetersauren Salze der Alkalimetalle, sowie die verdünnten Lösungen ihrer Chlorverbindungen.

IV. Typus. Der Strom zersetzt das Salz normal in Metall und den Rest, von den entstandenen Jonen verbindet sich das eine oder das andere mit dem Elektrolyten, d. h. mit dem gelösten Salze.

Beispiel *a*: Zinnchlorür in concentrirter Lösung:

	Kation	$SnCl_2$	Anion
Stromwirkung	Sn		Cl_2
Secundärer Process	—		$Cl_2 + SnCl_2$ $= SnCl_4.$

Das ausgeschiedene Chlor verbindet sich mit dem Zinnchlorür zu flüchtigem Zinnchlorid.

Beispiel *b*: Kupferchlorid (Anode aus Kohle):

	Kation	$CuCl_2$	Anion
Stromwirkung	Cu		Cl_2
Secundärer Process	$Cu + CuCl_2$ $= Cu_2Cl_2$		—

Das ausgeschiedene Kupfer verbindet sich mit dem Kupferchlorid zu Kupferchlorür.

V. Typus. Indem der Strom in normaler Weise das Salz in Metall und den Rest zersetzt, tritt dieser Rest mit dem Salze in Wechselzersetzung.

Beispiel: Salpetersaures Silberoxyd (concentrirte Lösung), Anode von Platin:

	Kation	$AgNO_3$	Anion
Stromwirkung	Ag		NO_3
Secundärer Process	—		$NO_3 + AgNO_3$ $= N_2O_5 + AgO.$

Die Gruppe NO_3 setzt sich mit $AgNO_3$ in N_2O_5 (Salpetersäure) und AgO (Silbersuperoxyd) um. Das Silber scheidet sich an der Kathode in Form glänzender Krystalle in dendritischer Form (Dianenbaum) aus, das Silbersuperoxyd erscheint als schwarzes krystallinisches Pulver, N_2O_5 verbindet sich mit Wasser zu Salpetersäurehydrat. In verdünnten Lösungen entsteht an der Anode nur Salpetersäure und Sauerstoff.

Aehnliche Zersetzungen bei essigsaurem Bleioxyd und den entsprechenden Salzen des Kobalts, Nickels, Mangans, Wismuths etc.

VI. Typus. Unter normaler Zersetzung des Salzes wird durch das abgeschiedene Anion die Anode oxydirt und gelöst.

Beispiel *a*: Kupfervitriol zwischen Kupferelektroden:

	Kation	$CuSO_4$	Anion
Stromwirkung	Cu		SO_4
Secundärer Process	—		$SO_4 + Cu$ $= CuSO_4$.

In diesem Falle wird durch den secundären Process die Stromwirkung insofern aufgehoben, als der ursprüngliche Elektrolyt wieder gebildet wird. Es muss jedoch die Lösung in der Nähe der Kathode ärmer an dem gelösten Salze werden, so dass die Stromwirkung in einer Uebertragung des Metalls von Anode zu Kathode und in einer umgekehrten Uebertragung des gelösten Salzes besteht. Derselbe Fall findet statt bei Zerlegung von Silber-, Zink-, Bleisalzen zwischen Platten desselben Metalls.

Beispiel *b*: Zinkvitriol zwischen Kupferelektroden:

	Kation	$ZnSO_4$	Anion
Stromwirkung	Zn		SO_4
Secundärer Process	—		$SO_4 + Cu$ $= CuSO_4$.

Der Fall ist dem vorigen ganz analog, da jedoch das Anodenmetall von dem des gelösten Salzes verschieden ist, so kommt es zu einer theilweisen Verdrängung des letzteren durch das entsprechende Salz des Anodenmetalls.

VII. Typus. Das Salz wird normal zersetzt, das ausgeschiedene Anion oxydirt und löst die Anode, das ausgeschiedene Kation reducirt die Kathode.

Beispiel: Lösung von Chlorzink zwischen Zink als Anode und Chlorsilber als Kathode:

Strom-wirkung	Kation	$ZnCl_2$	Anion
	Zn		Cl_2
Secundäre Processe	$2(AgCl) + Zn$ $= 2Ag + ZnCl_2$		$Cl_2 + Zn$ $= ZnCl_2$.

Hier wird also unter Abscheidung des metallischen Silbers aus dem Chlorsilber, welches als Kathode diente, das Zink der Anode gelöst und das ursprünglich gelöste Salz rückgebildet. Der Process verläuft analog, wenn man statt des Zinkchlorids von Anfang an verdünnte Salzsäure oder Schwefelsäure anwendet. Verbindet man das ausgeschiedene Silber oder auch das noch unzersetzte Chlorsilber ausserhalb der Zersetzungszelle metallisch mit dem Zink, so erhält man ein Element (Pincus), welches selbst den Strom liefert, wodurch der obige Process entsteht. Darauf beruht eine bekannte Methode der Chemiker, das Chlorsilber auf galvanischem Wege zu Silber zu reduciren.

VIII. Typus. Der Strom scheidet an der Kathode das Metall ab, welches daselbst das Wasser zersetzt, an der Anode zerfällt der Rest der Elemente in mehrere Gruppen.

Beispiel: Essigsaures Kali:

Strom-wirkung	Kation	$KC_2H_3O_2$	Anion
	K		$C_2H_3O_2$
Secundärer Process	$K + H_2O$ $= H + KHO$		$C_2H_3O_2 = CH_3 + CO_2$ (Methylgas, Kohlensäure)

Die Zersetzung der Salze sogenannter organischer Säuren verläuft häufig nach diesem, oft auch nach einem noch complicirteren Schema, indem eine Reihe von secundären Reactionen die primäre Zersetzung durch den Strom begleiten.

Die hier vorgeführten Typen geben nur eine Uebersicht der häufigsten elektrolytischen Processe, deren noch viele andere mehr oder weniger mannigfaltige bekannt sind. Ihr Studium hat jedoch mehr Interesse für den Chemiker als für den Physiker.

Nach W. Hittorf*) werden von allen chemischen Verbindungen stets nur diejenigen zersetzt, welche den Charakter eines Salzes besitzen. Dabei werden unter dem Namen Salze diejenigen Verbindungen verstanden, „deren Molecüle erfahrungsgemäss im flüssigen Zustande, insbesondere in Lösung, bestimmte Theilbestandtheile stets mit denen gleich constituirter Verbindungen austauschen". Die bei der Elektrolyse auftretenden Jonen sind dieselben Theilbestandtheile, welche bei chemischen Umsetzungen eine Rolle spielen.

*) Wiedem. Ann. 1878, S. 374.

Recht instructiv ist in dieser Richtung die Elektrolyse gewisser Doppelsalze, z. B. Cyansilberkalium ($Ag\,Cy + K\,Cy$), Natriumplatinchlorid, ($Pt\,Cl_2 + Na\,Cl$). Nach der älteren, von Hittorf bekämpften Berzelius'schen Theorie, nach welcher stets die sogenannten elektropositiven Elemente zur Kathode, die elektronegativen zur Anode wandern, wäre zu erwarten, dass obige Doppelsalze sich nach folgenden Schematen zersetzen:

$$\underbrace{\mathrm{Ag\,Cy + K\,Cy}}_{\mathrm{Ag,\ K} \qquad\qquad \mathrm{2\,Cy}}$$

$$\underbrace{\mathrm{Pt\,Cl_2 + Na\,Cl}}_{\mathrm{Pt,\ Na} \qquad\qquad \mathrm{3\,Cl.}}$$

Statt dessen erfolgt die Zerlegung durch den Strom in der Weise, dass K, Na nach der Kathode wandern, während $Ag\,Cy_2$, $Pt\,Cl_3$ zur Anode gehen. Genau in dieselben Bestandtheile werden aber diese Doppelsalze auch bei rein chemischen Umsetzungen gespalten.

Wenn es mittelst der Lösung des ersteren Doppelsalzes dennoch gelingt, die Kathode zu versilbern, so geschieht dies nur vermöge einer secundären, rein chemischen Action, indem das ausgeschiedene Kalium aus der Lösung des Salzes das Silber verdrängt.

159 Experimente über die Elektrolyse der Salzlösungen.

Um die bei der Elektrolyse der Salzlösungen auftretenden Zersetzungsproducte getrennt auffinden und quantitativ bestimmen zu können, muss man dafür Sorge tragen, dass sie sich nicht wieder vermischen, bevor sie untersucht sind.

Fig. 453.

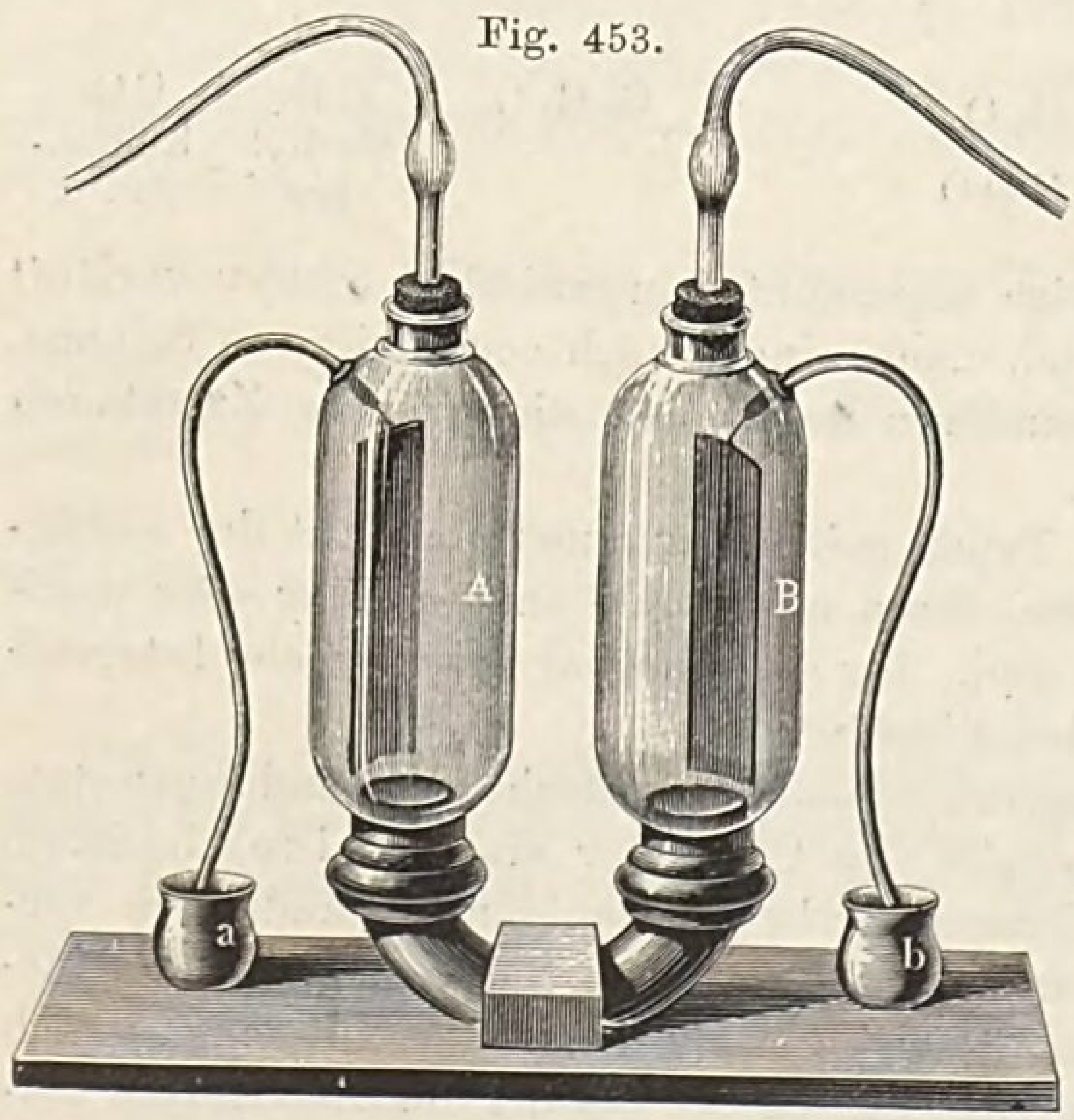
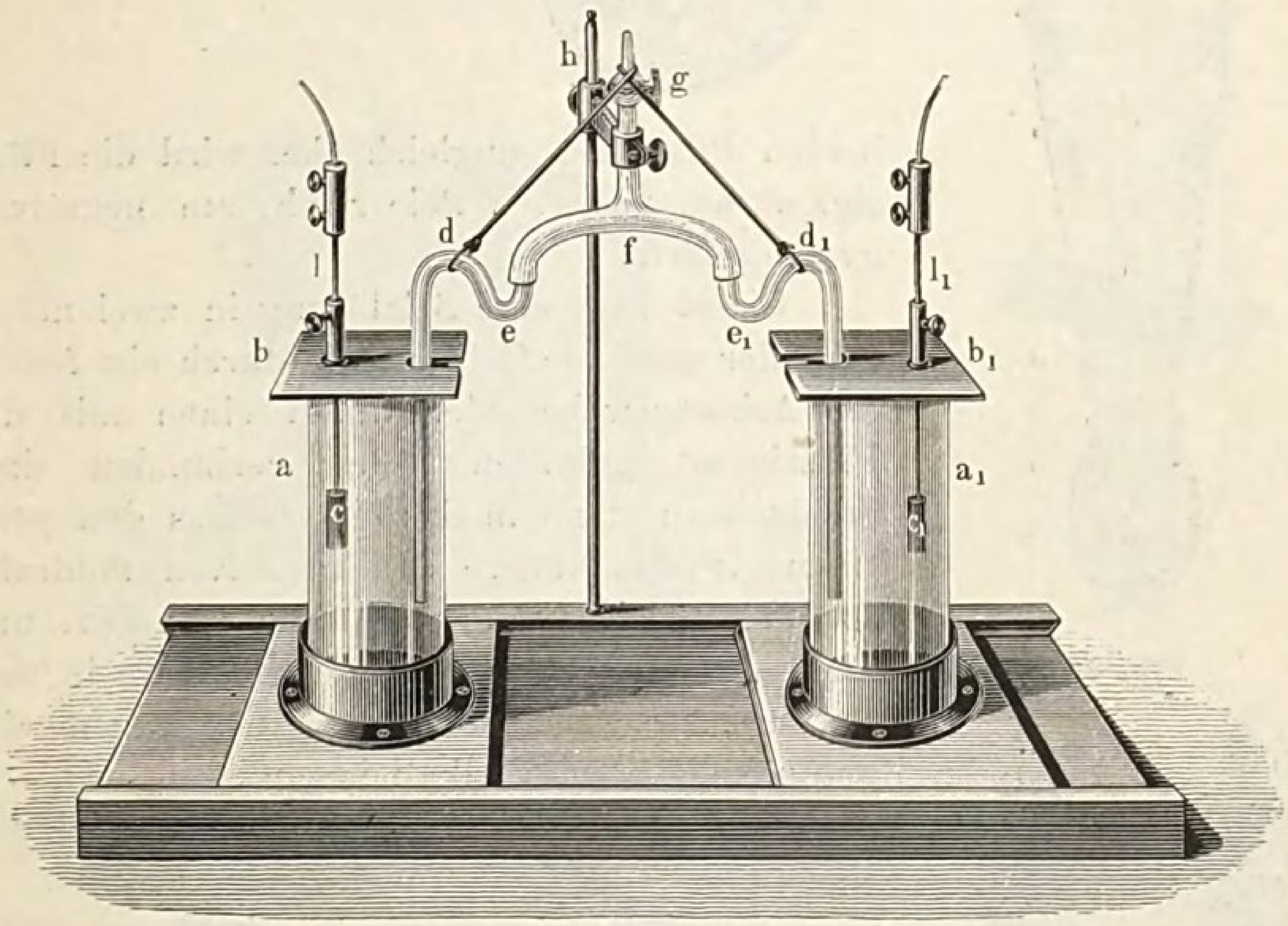


Fig. 453 zeigt einen von Daniell hierzu construirten Apparat, bestehend aus den Glasgefässen *A* und *B*, welche die Elektroden aus Platinblech enthalten und unten durch ein ◡-förmiges beiderseits mit Thierblase geschlossenes Glasrohr verbunden sind. Oben sind engere Glasröhren eingesetzt, um entwickelte Gase abzuführen. Sicherer gelingt die Trennung der Zersetzungsproducte durch den Apparat von G. Wiedemann, Fig. 454. In jedes

der beiden Gefässe a und a_1 ist ein Glasrohr eingesetzt, welches oben gebogen ist, wie es unsere Figur zeigt. Diese beiden Glasröhren sind dann durch ein angeschliffenes Verbindungsrohr in Communication gesetzt, in welches oben ein Glashahn eingesetzt ist. Um den so gebildeten Heber zu füllen, wird der Glashahn geöffnet und dann die Flüssigkeit aufgesaugt, bis die Glasröhren ganz gefüllt sind. — Nach Beendigung der Elektrolyse wird der Hahn geöffnet und es sinkt nun der Inhalt eines jeden Rohres in sein Gefäss zurück, ohne dass ein Ueberströmen aus einem Gefäss in das andere stattfinden kann.

Hittorf verwendete Apparate, wie sie durch die Fig. 455 und 456 (a. f. S.) dargestellt sind. Die einzelnen Glasgefässe sind am Boden durch Thierblasen geschlossen und mittelst Kautschuk dicht in einander ge-

Fig. 454.



steckt. Der Apparat Fig. 455 dient für solche Zersetzungen, bei welchen kein Gas entwickelt wird, indem die Kathode A aus einem Metalle besteht, welches gelöst wird. Fig. 456 wird angewendet, wenn die Gasentwickelung nicht zu vermeiden ist. Nach vollendeter Elektrolyse können die einzelnen Theile des Apparates getrennt werden. Die Zersetzungsproducte werden dann durch chemische Operationen in dem obersten und untersten Gefässe des Apparates ermittelt und der Menge nach bestimmt.

Zum Zwecke eines Vorlesungsversuches lässt sich die Zerlegung der Salze nach dem Typus III des vorigen Paragraphen auf folgende Weise sehr gut sichtbar machen. Man fülle eine U-förmig gebogene Röhre, Fig. 457 oder Fig. 458 (a. f. S.), mit einer Salzlösung, etwa mit einer Lösung von Glaubersalz, die durch etwas Malventinctur violett gefärbt ist.

Taucht man nun auf der einen Seite die positive, auf der anderen die negative Polplatte in die Flüssigkeit, so tritt eine Gasentwickelung an

Fig. 455.

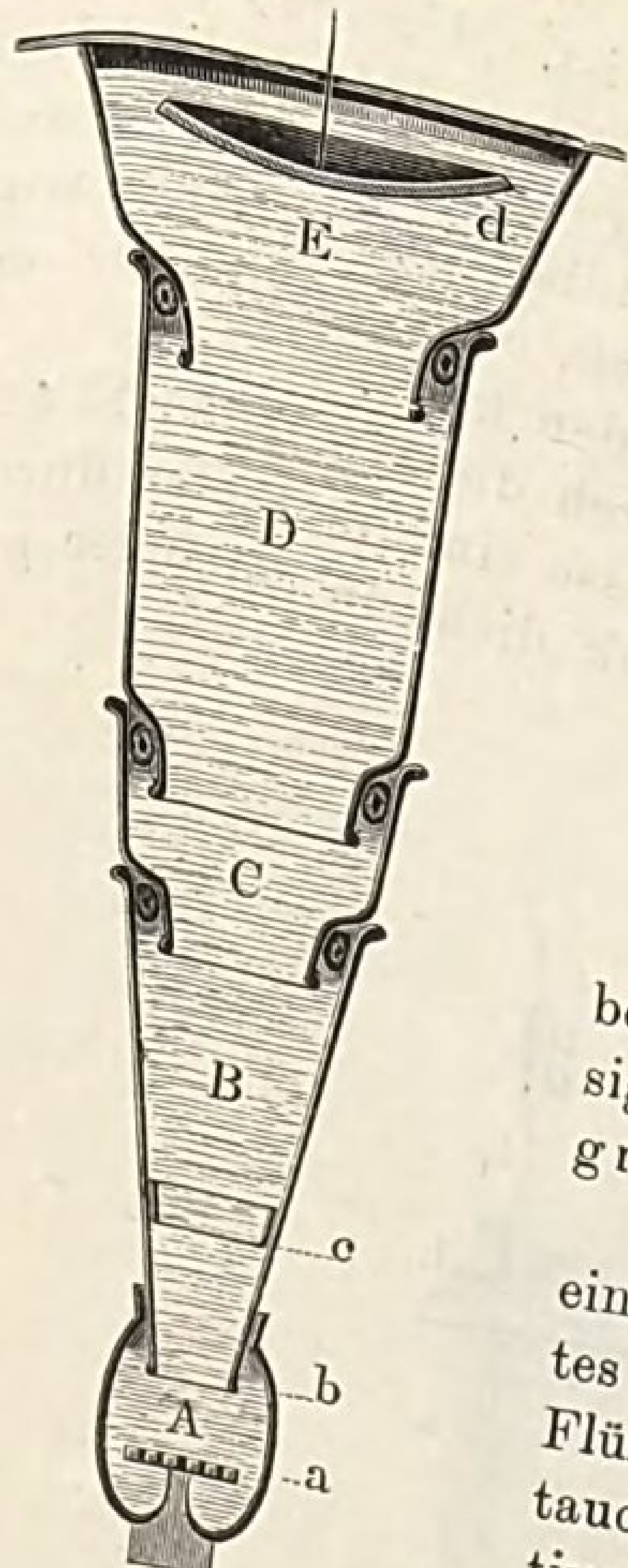
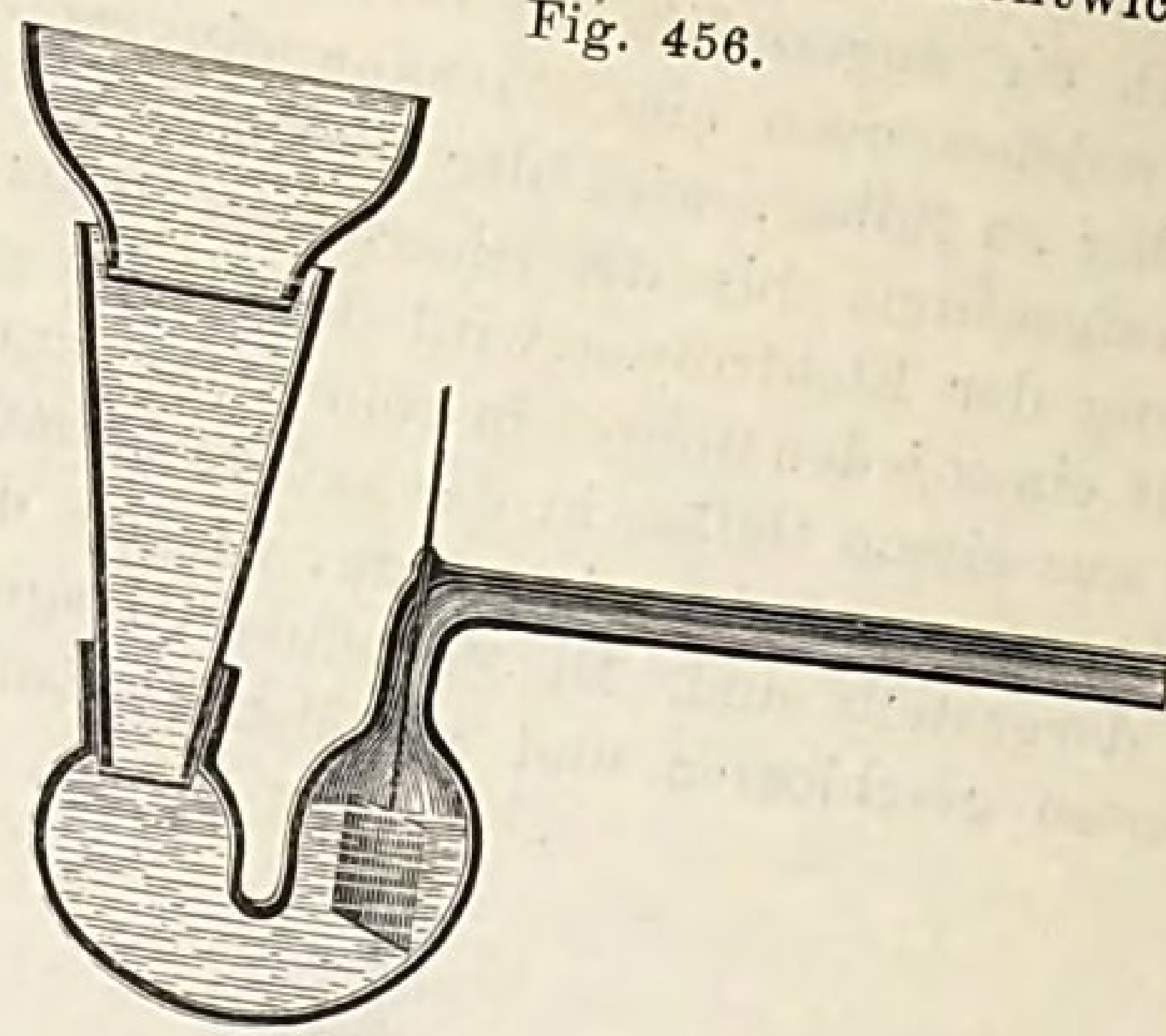


Fig. 456.



beiden Polen ein, zugleich aber wird die Flüssigkeit am positiven Pole roth, am negativen grün gefärbt.

Giesst man eine Salzlösung in zwei neben einander stehende Gefässe, die durch ein feuchtes Asbestgewebe oder durch einen mit der Flüssigkeit gefüllten Heber verbunden sind, taucht man dann in das eine Gefäss den positiven, in das andere den negativen Poldraht, so geht die Zersetzung ebenfalls vor sich, und nach einiger Zeit findet sich freie Säure in dem Gefässe, in welchem der positive Draht eingetaucht ist, freies Alkali im anderen.

Fig. 457.

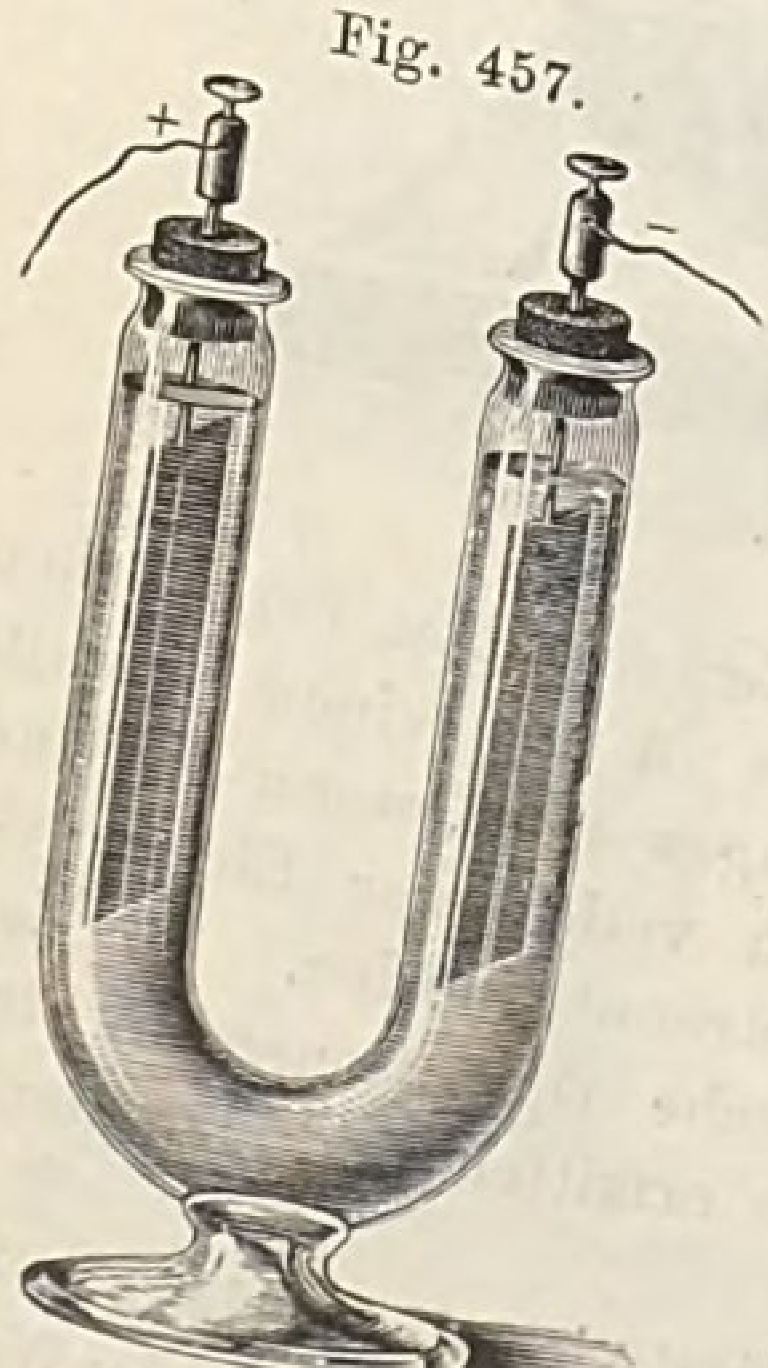


Fig. 458.



Die Zersetzung des salpetersauren Silbers, des essigsauren Bleies u. dergl. nach dem Typus V kann man in einem Auditorium vielen Zuschauern zugleich am besten dadurch zeigen, dass man die ganze

Zersetzungszelle nebst deren inneren Vorgängen mittelst des Projectionsapparates (Band II, 1.) auf einen weissen Schirm projicirt. Man bedient sich hierzu einer aus Glastheilen zusammengefügten flachen Zelle, Fig. 459, in welche man die Elektrodendrähte mittelst Korkstückchen, durch welche sie hindurchgeführt sind, einhängt. Stellt man die Zelle dann in den Objectenraum der Projectionslampe, so erhält man ein sehr vergrössertes verkehrtes Bild der Elektroden und der elektrolytischen Vorgänge auf dem Projectionsschirme. Bei Anwendung einer concentrirten Lösung von salpetersaurem Silberoxyd erscheinen an der Kathode prächtige Krystallausscheidungen von metallischem Silber (Dianenbaum), an der Anode (von Platin) krystallinisches Silbersuperoxyd oder auch Sauerstoffgas. Noch schöner repräsentirt sich der sogenannte Saturnbaum, das ist krystallinisch ausgeschiedenes metallisches Blei, wie man

Fig. 459.

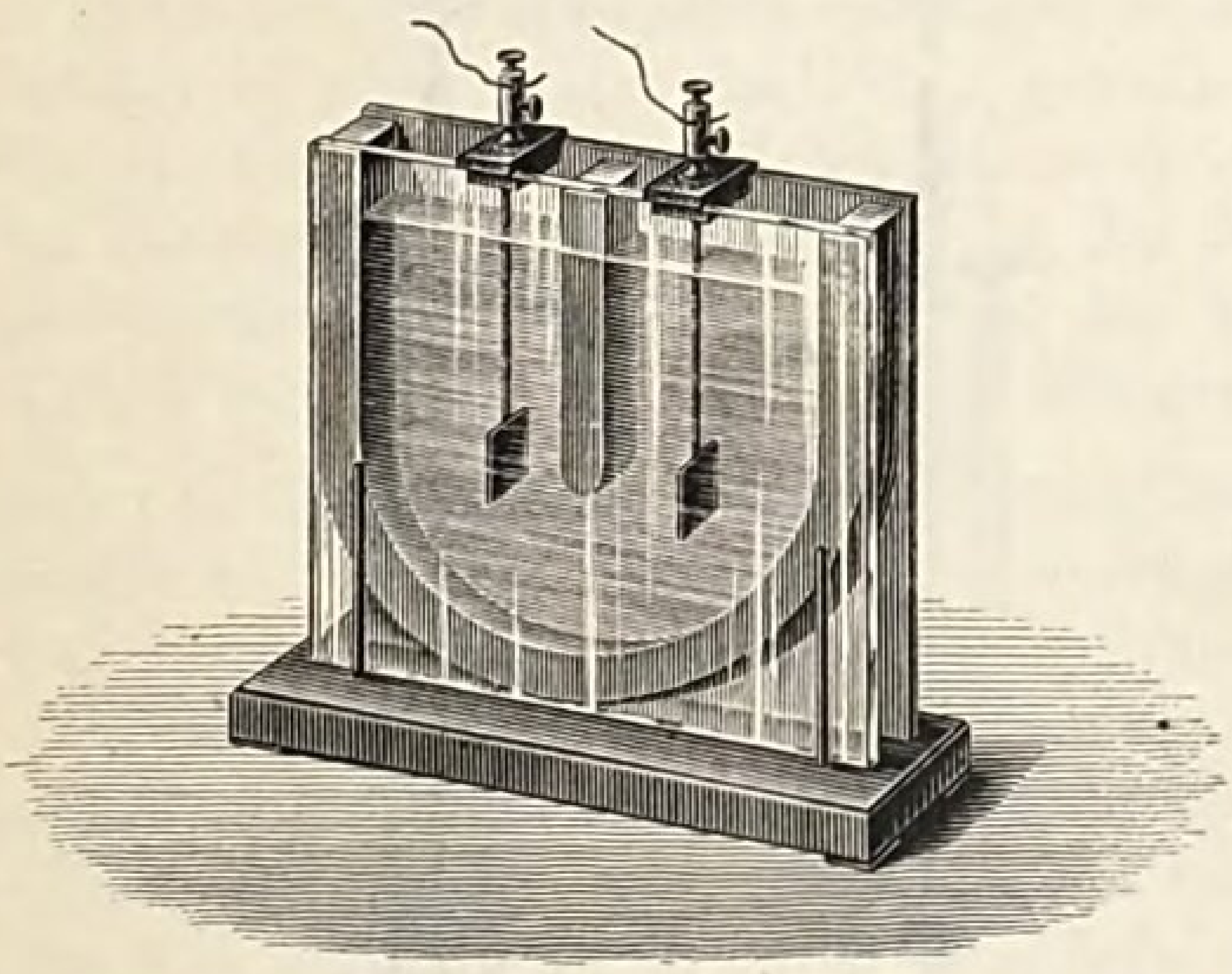
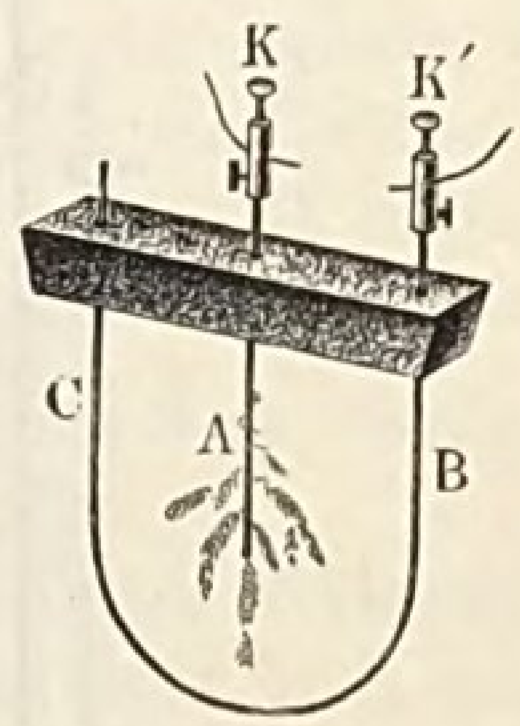


Fig. 460.

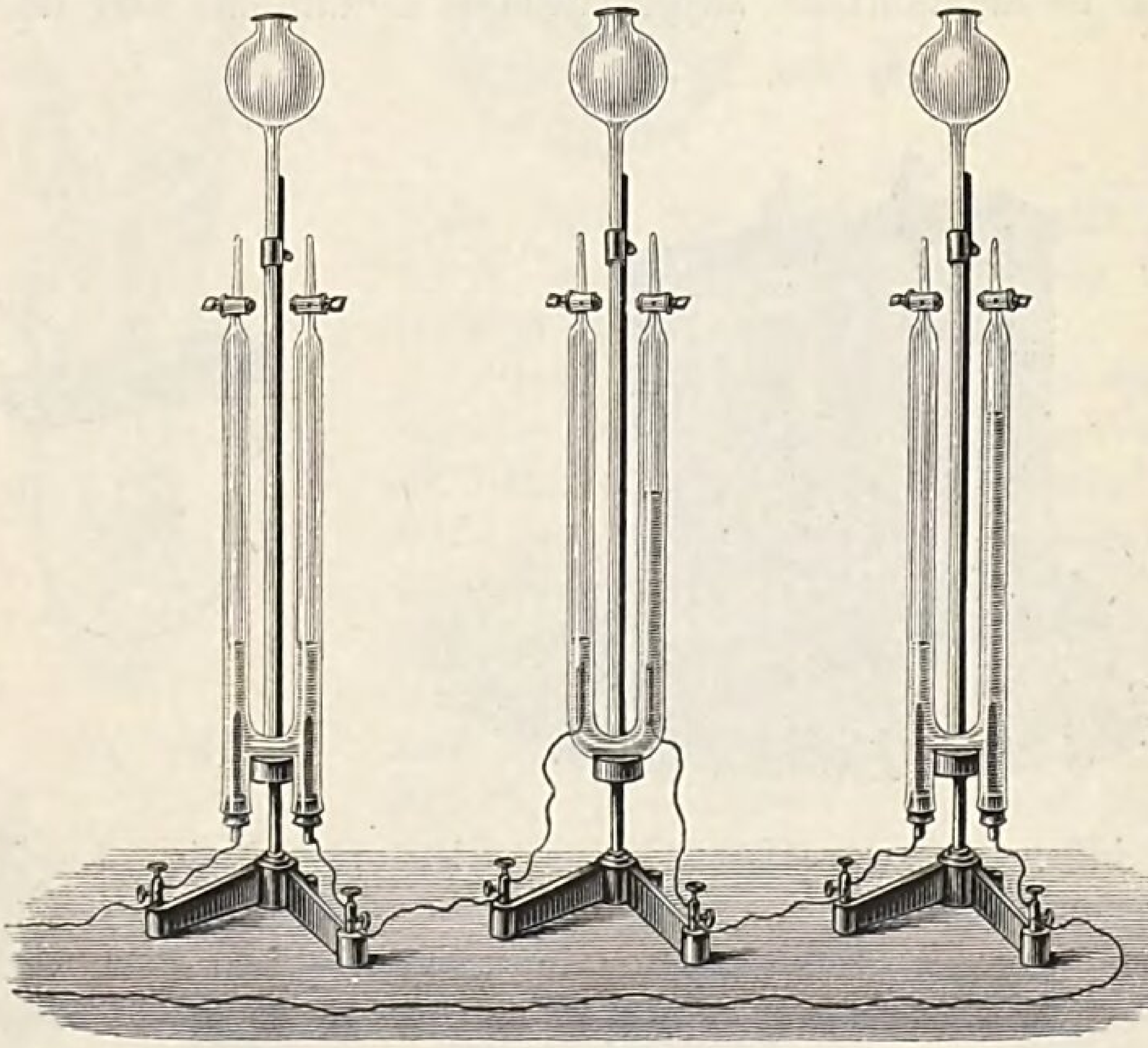


es erhält, indem man eine Lösung von essigsaurem Bleioxyd zwischen Bleielektroden zersetzt.

Diesem Experimente kann man eine recht niedliche Form dadurch geben, dass man in die Zersetzungszelle, Fig. 459, mittelst eines keilförmigen Korkstückes zwei Bleidrähte einführt, von denen der eine, *A*, in der Mitte gerade gestreckt ist, der andere, *B C*, in Form eines Bogens herumgeführt ist (Fig. 460). Füllt man hierauf die Bleizuckerlösung bis nahe zum Korke ein und lässt einen Strom vom Bogen *B C* nach *A* gehen, so entwickeln sich an dem Stamm *A* sofort nach abwärts und seitwärts sich verästelnde Zweige, welche auf dem Schirme wegen Umkehrung des Bildes als wachsender Baum erscheinen. Kehrt man dann die Stromrichtung um, so werden die Zweige wieder verzehrt und es bilden sich dafür am Bogen *B C* Zweige aus, welche demselben das Ansehen einer Laube geben.

160 **Faraday's elektrolytisches Gesetz.** Wir haben bisher die Zersetzungserscheinungen verfolgt, insoweit sie in je einer einzigen Zersetzungszelle vor sich gehen. Es ist unmittelbar klar, dass die hierbei ausgeschiedenen Jonen zu einander in denselben Mengenverhältnissen stehen müssen, wie sie in den Verbindungen vorkommen, also in stöchiometrischen Verhältnissen. Eine andere Frage geht nun dahin, in welchen Mengenverhältnissen jene Bestandtheile stehen, welche durch einen und denselben Strom in verschiedenen Elektrolyten ausgeschieden werden. Hierüber hat Faraday im Jahre 1833 ein wichtiges Gesetz entdeckt, welches häufig das Gesetz der festen elektrolytischen Action, meistens kurz das Faraday'sche Gesetz, genannt wird. Dasselbe

Fig. 461.



lässt sich in einfachster Form so aussprechen: die durch denselben Strom zersetzten Mengen verschiedener Elektrolyte sind unter sich äquivalent. Hieraus folgt dann selbstverständich auch, dass die durch denselben Strom ausgeschiedenen Mengen der Jonen unter sich äquivalent seien.

Leitet man z. B. einen Strom durch vier hinter einander eingeschaltete Zersetzungszellen, deren erste angesäuertes Wasser, deren zweite geschmolzenes Chlorsilber, deren dritte geschmolzenes Jodblei, deren vierte geschmolzenes Chlorzinn enthält und lässt man den Strom so lange hindurchgehen, bis der ausgeschiedene Wasserstoff gerade 1 mg (11,17 ccm) beträgt, so findet man die Mengen der erhaltenen Jonen in den vier Zersetzungszellen wie folgt:

In der ersten	1	mg	H,	in der dritten	103,20	mg	Pb.	
" " "	8	"	O,	" " "	126,54	"	J.	
" " zweiten	107,66	"	Ag,	" " vierten	58,67	"	Sn.	
" " "	35,37	"	Cl,	" " "	35,37	"	Cl.	

Diese Gewichtsmengen sind aber einander äquivalent. Um als Vorleseversuch das Faraday'sche Gesetz zu demonstriren, kann man sich nach A. W. Hofmann des Apparates Fig. 461 bedienen. Derselbe besteht aus drei Voltametergefässen, wie wir ein solches in §. 155 beschrieben haben, mit der Modification, dass die Elektroden der beiden äusseren Voltameter aus Kohlenstiften gebildet sind, welche durch Kautschukstopfen hineinragen. Diese drei Voltameter werden mit Salzsäure, angesäuertem Wasser und Ammoniakflüssigkeit gefüllt. Bevor man ans Messen der durch den Strom entwickelten Gase geht, muss man längere Zeit die Flüssigkeit mit diesen sich sättigen lassen und dann erst die Hähne absperren. Es entwickelt sich dann beim weiteren Hindurchleiten des Stromes in allen dreien ein gleich grosses Volum Wasserstoff und daneben in der ersten ein gleiches Volum Chlorgas, in der zweiten ein halb so grosses Volum Sauerstoffgas, in der dritten ein ein Drittel so grosses Volum Stickstoffgas entsprechend den Formeln HCl, H_2O, H_3N $\left(= HCl, HO_{\frac{1}{2}}, HN_{\frac{1}{3}}\right)$. Als äquivalente Mengen im Sinne des oben ausgesprochenen Gesetzes sind also solche Mengen Cl, O und N zu betrachten, welche mit gleichen Mengen von H verbunden sind.

Faraday glaubte ursprünglich sein Gesetz auf binäre Verbindungen, d. h. solche, welche aus einem Atom eines Elementes und einem Atom eines zweiten zusammengesetzt sind, beschränken zu müssen; allein diese Beschränkung ist, wie obiges Beispiel zeigt, nicht nöthig. Wird z. B. ein und derselbe Strom durch eine Zelle mit concentrirter Lösung von Kupferchlorid ($CuCl_2$) und durch eine solche mit Kupferchlorür (Cu_2Cl_2) geleitet, so wird an den beiden Anoden gleich viel Cl, an den Kathoden dagegen eine ungleiche Menge Kupfer abgeschieden. Es giebt also auch hier das einwerthige, d. h. ein Atom H vertretende Cl den Ausschlag. Wir werden also sagen: elektrolytisch äquivalent sind gegen einander je ein Atom eines einwerthigen Elementes und eine solche Menge von den mehrwerthigen Elementen, welche mit einem Atom eines einwerthigen verbunden ist.

Im §. 122 haben wir mitgetheilt, dass nach den Messungen von F. Kohlrausch der Strom 1 Amp. per Secunde 1,118 Milligramm Silber ausscheidet. Mittelst der chemischen Aequivalentgewichte lässt sich hieraus für jedes andere Element die Menge berechnen, die durch denselben Strom in der Secunde ausgeschieden wird. Diese Mengen heissen die elektrochemischen Aequivalente. Da nun die Quantität von Elektricität, welche bei 1 Amp. Stromstärke in der Secunde durch den Querschnitt des Leiters fliesst, ein Coulomb genannt wurde, so kann man sagen, dass jedes Coulomb Elektricität auf seinem Wege durch den

Elektrolyten eine solche Menge irgend eines Elementes (in Milligramm gemessen) zur betreffenden Elektrode mit sich führt, als durch das elektrochemische Aequivalent des Elementes ausgedrückt wird. In folgender Tabelle *) sind für einige der wichtigeren Elemente die Atomgewichte, chemischen und elektrochemischen Aequivalente aufgeführt.

Name des Elements	Atomgew.	Chemisches Aequivalent	Elektrochemisches Aequivalent
Wasserstoff	1	1	0,010386 **)
Aluminium	27,04	9,013	0,09361
Blei	206,39	103,195	1,0718
Gold	196,2	65,40	0,6792
Kalium	39,03	39,03	0,4050
Kupfer	63,18	31,59	0,3280
Magnesium	23,94	11,97	0,1245
Natrium	22,99	22,99	0,2388
Nickel	58,6	29,3	0,304
Platin	194,43	97,22	1,0097
Quecksilber	199,8	99,9	1,038
Silber	107,66	107,66	1,1183
Zink	64,88	32,44	0,3369
Zinn	117,35	58,67	0,6094
Brom	79,76	79,76	0,8284
Chlor	35,37	35,37	0,3674
Jod	126,54	126,54	1,3142
Sauerstoff	16	8	0,0831

Die Zahlen der letzten Columne sind aus dem chemischen Aequivalent durch Multiplication mit 0,010386 (dem elektrochemischen Aquivalent des Wasserstoffs) entstanden.

161 **Scheinbare Ausnahme von Faraday's Gesetz; elektrolytische Convection.** Faraday selbst machte die Beobachtung, dass man schwache Ströme durch Wasser leiten könne, deren Existenz durch Galvanometer, also durch Wirkung auf den Magneten, nachgewiesen werden kann, ohne dass eine gleichzeitige Entwickelung von Knallgas beobachtet wird. Er glaubte daher, dass die Flüssigkeiten neben jener Leitungfähigkeit, welche mit Zersetzung verbunden ist

*) Nach Kohlrausch's Messungen von Uppenborn berechnet.

**) Nach Mascart 0,010415.

(elektrolytische Leitungsfähigkeit), auch noch in geringerem Grade ein von der Zersetzung unabhängiges Leitungsvermögen (metallische Leitungsfähigkeit) besitzen. Die Annahme eines solchen würde zur Folge haben, dass nicht unbedingt die chemische Wirkung proportional der Stromstärke wäre und dass daher das Voltameter nicht die volle Stromstärke zu messen gestattet. Faraday's Ansicht hat sich jedoch nicht bestätigt. Insbesondere durch De la Rive und Buff wurde erwiesen, dass es eine metallische Stromleitung in den nicht metallischen Flüssigkeiten nicht giebt, und dass schon für Ströme, die so schwach sind, dass durch dieselben nur $^1/_{80}$ cbmm Wasserstoff per Stunde abgeschieden wird, dennoch die Proportionalität zwischen der durch Wirkung auf Magnete nachgewiesenen und der chemisch nachgewiesenen Stromstärke besteht.

Faraday's entgegengesetzte Beobachtungen erklären sich theils durch den Umstand, dass die an den Elektroden in Freiheit gesetzten Gase von der Flüssigkeit gelöst werden, theils durch einen Vorgang, den H. v. Helmholtz mit dem Namen „elektrolytische Convection“ belegt hat. Man versteht sonst unter Convection eine Ausbreitung der Elektricität, welche nicht dadurch erfolgt, dass die Elektricität längs des Leiters fortwandert, sondern dadurch, dass sie mit dem Leiter fortgeführt wird. Taucht man z. B. einen geladenen Leiter in eine nicht leitende Flüssigkeit, so nimmt dieselbe dort, wo sie den Leiter berührt, Elektricität auf. Die elektrisch gewordenen Theilchen können dann mechanisch fortgeführt und mit ihnen die Elektricität fortgetragen werden. Die elektrolytische Convection ist auf folgende Weise zu erklären. Versucht man angesäuertes aber luftfreies Wasser durch den Strom eines Daniell'schen Elementes zwischen Platinelektroden zu zersetzen, so gelingt es nicht, weil die elektromotorische Gegenkraft der Polarisation jener des Daniell entgegenwirkt. Ist das angesäuerte Wasser aber lufthaltig, so gelingt es dennoch, einen schwachen Strom ohne sichtbare Zersetzung hindurch zu leiten. Dies kommt aber daher, weil sich der ausgeschiedene Wasserstoff mit dem gelösten Sauerstoff an der Kathode wieder zu Wasser vereinigt, während der ausgeschiedene Sauerstoff wieder gelöst wird. Aehnlich kann gelöster Wasserstoff wirken. Es kommt also offenbar zu keiner bleibenden Zersetzung, wenn ein schwacher Strom durch angesäuertes Wasser hindurchgeht, in welchem Sauerstoffgas oder Wasserstoffgas gelöst sind, sondern nur zu einer anderen Vertheilung des gelösten Gases. Der Fall hat daher eine gewisse Analogie mit dem Durchgang eines Stromes durch eine Metalllösung zwischen Elektroden aus demselben Metalle (Kupfervitriol zwischen Kupfer), wo auch trotz des Stromes keine bleibende Zersetzung vorhanden ist. Sind die Platinelektroden im Voltameter sehr klein (Wollaston'sche Spitzen), so findet bei einem Strom von genügender Stärke der ausgeschiedene Wasserstoff in der Nähe nicht genug gelösten oder auf dem Platin haftenden Sauerstoff vor, um das Phänomen der elektrolytischen Convection zu bewirken, dagegen sind grosse Elektroden demselben offenbar günstig.

Eine andere scheinbare Ausnahme von Faraday's Gesetz kommt bei der Elektrolyse der Salzlösungen zum Vorschein. Zersetzt man z. B. eine verdünnte Lösung von schwefelsaurem Natron, $Na_2\,SO_4$, zwischen Platinplatten, so erhält man an den Elektroden nicht allein eine der Stromstärke entsprechende Menge von Wasserstoff und Sauerstoff, sondern ausserdem an der Anode Schwefelsäure und an der Kathode Natronlauge, während in einem mit eingeschalteten Voltameter nur eine gleiche Menge Knallgas entwickelt wird. Die chemische Action in der Salzlösung scheint also nicht äquivalent zu sein, sondern einen Ueberschuss zu liefern. Wollte man annehmen, dass sich der Strom zwischen dem Wasser und dem Salz getheilt und deshalb von beiden einen Theil zersetzt habe, so müsste die Knallgasmenge eine entsprechend geringere sein. Dieser Widerspruch klärt sich auf, indem man auf die secundäre Action Rücksicht nimmt. Der Strom zersetzt nur ein Aequivalent Salz in Na_2 und SO_4, diese wirken secundär auf H_2O, wodurch H_2 und O frei werden und zugleich einerseits Na_2OH_2O, d. i. Natronhydrat, andererseits SO_4H_2, d. i. Schwefelsäurehydrat, gebildet werden, wie wir dies bereits im §. 158 gezeigt haben. Diese von Daniell stammende Theorie will nun aber mit der Elektrolyse der verdünnten Schwefelsäure nicht recht harmoniren.

Wenn das Schwefelsäurehydrat wirklich Wasserstoffoxysulphion ist, so muss es bei der Elektrolyse in H_2 und SO_4 zerlegt werden; das am positiven Pol frei werdende Oxysulphion zerfällt aber sogleich in SO_3 und O, welch letzterer Bestandtheil gasförmig entweicht, während SO_3 in der Flüssigkeit zurückbleibt; es müsste also für jedes Aequivalent Wasserstoffgas, H_2, welches an der negativen, und für jedes Aequivalent Sauerstoff, O, welches an der positiven Elektrode frei wird, ein Aequivalent Schwefelsäure, SO_3, am positiven Pole auftreten; den Versuchen Daniell's zufolge findet sich aber nach der Elektrolyse in der positiven Zelle nur $^1/_4$ Aequivalent SO_3 mehr als vorher.

Daniell erklärt dies dadurch, dass er die verdünnte Schwefelsäure als ein zusammengesetztes Elektrolyt, bestehend aus Wasser und Schwefelsäurehydrat, betrachtet. Der Strom theile sich zwischen beiden so, dass $^3/_4$ durch Wasser, $^1/_4$ durch Schwefelsäurehydrat geleitet werde, und man erhält also:

am positiven Pole	am negativen Pole
$\frac{3}{4}$ Aeq. O	$\frac{3}{4}$ Aeq. H_2
$\frac{1}{4}$ Aeq. SO_4	$\frac{1}{4}$ Aeq. H_2,

und durch Zerfallen von SO_4

am positiven Pole	am negativen Pole
$\frac{3}{4}$ Aeq. O	$\frac{3}{4}$ Aeq. H_2
$\frac{1}{4}$ Aeq. SO_3 + $\frac{1}{4}$ Aeq. O	$\frac{1}{4}$ Aeq. H_2
$\frac{1}{4}$ Aeq. SO_3 + 1 Aeq. O	1 Aeq. H_2

wie es der Versuch gezeigt hat.

Allein diese Erklärung können wir schon deshalb nicht mehr zulassen, weil ja F. Kohlrausch gezeigt hat, dass das Wasser für sich so gut wie gar nicht den Strom leitet. Wir müssen also neben der äquivalenten Zersetzung noch eine besondere Wanderung der entstandenen Verbindungen annehmen, wovon der folgende Paragraph handeln wird.

Wanderung der Ionen zwischen den Polen. Wenn 162
man die der Elektrolyse auszusetzende Lösung in zwei getrennte Gefässe füllt, wenn man dann dieselben durch ein mit derselben Lösung gefülltes Heberrohr verbindet, und in das eine Gefäss die positive, in das andere Gefäss die negative Polplatte eintaucht, so bleibt, wie wir dies schon im vorigen Paragraphen gesehen haben, die Zusammensetzung der Lösung in beiden Gefässen keineswegs die gleiche, allein eine genauere Untersuchung, wie sie durch die grundlegenden Arbeiten von Hittorf*) und die ergänzenden von G. Wiedemann und Weiske vorgenommen wurde, hat ergeben, dass zur Erklärung der hier auftretenden Erscheinungen die im vorigen Paragraphen besprochene Daniell'sche Theorie keineswegs ausreicht.

Um nach beendigter Elektrolyse den Heber entfernen zu können, ohne dass durch denselben ein Theil des Inhalts aus dem einen Gefässe in das andere überfliessen kann, wandte Wiedemann die schon oben erwähnte Vorrichtung, Fig. 453, an.

In das eine der beiden Gefässe wurde die positive, in das andere die negative Polplatte eingetaucht und ausser diesem Zersetzungsapparate noch eine mit Kupfervitriollösung gefüllte Zersetzungszelle in den Schliessungsbogen der aus 12 bis 16 Daniell'schen Bechern bestehenden Säule eingeschaltet. — Der Strom blieb 10 bis 12 Stunden im Gange, und das Gewicht des während dieser Zeit an der negativen Polplatte der Kupfervitriolzelle niedergeschlagenen Kupfers diente dann als Maass für die chemische Wirkung, welche der Strom hervorgebracht hatte.

Folgendes sind die Resultate einiger mit dieser Vorrichtung angestellter Versuche, bei welchen die in die beiden Gefässe eingetauchten Polplatten aus Platin bestanden.

Als in die beiden Gefässe verdünnte Schwefelsäure eingefüllt worden war, deren specifisches Gewicht 1,116 betrug, war nach Beendigung der Elektrolyse das Gefäss, in welches man die positive Polplatte eingetaucht hatte, reicher an Schwefelsäure geworden, und zwar fand sich, dass für 1 Aequivalent des in der Voltameterzelle niedergeschlagenen Kupfers 0,18 Aquivalent Schwefelsäure von dem negativen zu dem positiven Pole übergeführt worden war. In gleicher Weise fand Wiedemann

*) Eine Uebersicht der Hittorf'schen Arbeiten findet sich in Wiedemann's Elektricitätslehre 3. Aufl. II, 585.

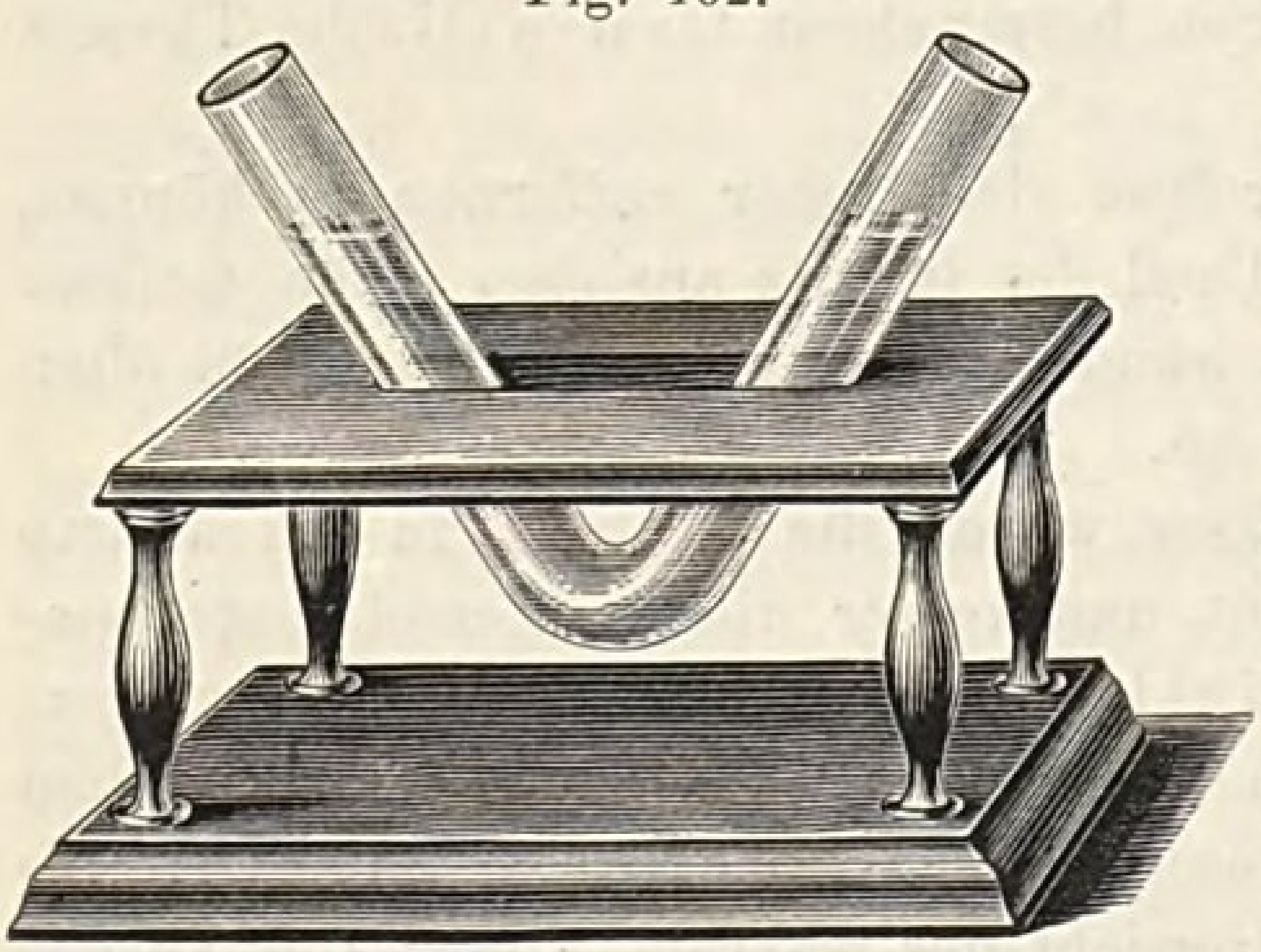
für eine Natronlösung vom specifischen Gewichte 1,06, dass auf 1 Aequivalent des im Voltameter abgeschiedenen Kupfers 0,16 Aequivalent Natron vom positiven zum negativen Pole übergeführt worden war.

Die Säuren wandern also zum positiven, die Basen zum negativen Pol.

Als auch die beiden Glasgefässe mit einer Lösung von Kupfervitriol gefüllt waren (specif. Gewicht 1,09), fand sich, dass auf 1 Aequivalent des an der negativen Polplatte abgesetzten Kupfers 0,18 Aequivalent Kupfer in das negative Gefäss übergegangen waren, und als beide Polplatten von Kupfer waren, stieg die in das negative Gefäss übergegangene Kupfermenge auf 0,36 des an der negativen Polplatte abgelagerten Kupfers.

Da also, mögen nun die Polplatten aus Platin oder aus Kupfer bestehen, nicht so viel Kupfer aus dem positiven in das negative Gefäss übergeht, als sich aus der Lösung des negativen Gefässes auf die negative Polplatte absetzt, so ist klar, dass die Flüssigkeit um den negativen Pol fortwährend heller wird, wie man dies auch schon beobachten kann, wenn man die Elektrolyse der Kupfervitriollösung in der Röhre, Fig. 462, vornimmt.

Fig. 462.



Sind beide Polplatten von Platin, so nimmt der Kupfergehalt der Lösung am positiven und am negativen Pole ab, am negativen aber schneller. Sind die Elektroden von Kupfer, so nimmt der Kupfergehalt am positiven Pole zu, weil für 1 Aequivalent Kupfer, welches an der negativen Elektrode niedergeschlagen wird, auch 1 Aeq. Kupfer vom positiven Pole gelöst wird, während eine weit geringere Kupfermenge zum negativen Pole überwandert.

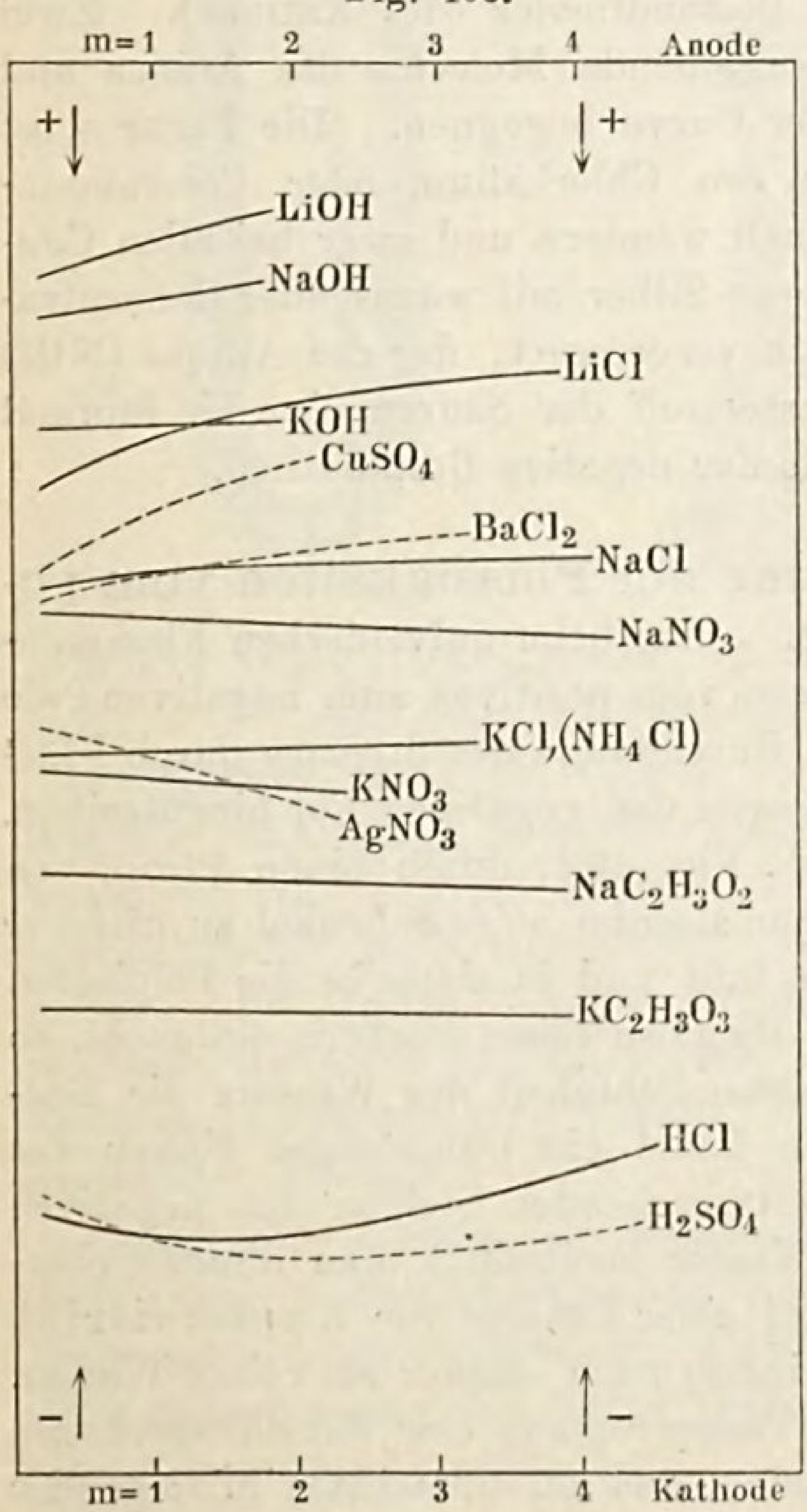
Hittorf erklärte dieses Ergebniss dadurch, dass zwar beide Elektricitäten mitsammt ihren Ionen nach den betreffenden Elektroden hin wandern, dass aber diese Wanderung mit ungleicher Geschwindigkeit stattfindet. So legt z. B. der Bestandtheil SO_4 nahe den doppelten Weg zurück, wie der Bestandtheil Cu gleichzeitig in entgegengesetzter Richtung zurücklegt. Dieses Verhältniss ändert sich nach der Natur des Elektrolyts und nach der Concentration der Lösung. Da gemäss dem Faraday'schen Gesetze in elektrolytischer Beziehung von verschiedenen Stoffen nicht gleiche Massen einander gleichwerthig sind, sondern gleiche Anzahl von Molecülen (Aequivalenten), so verglich Hittorf nicht die Gewichtsmengen, sondern die übergeführten Molecülmengen mit einander und drückte die

Ergebnisse bei jeder Lösung durch eine Constante n aus, welche er die Ueberführungszahl des Anions nannte. Diese Zahl hat folgende Bedeutung: Denkt man sich durch die Flüssigkeit zwischen den Elektroden einen Querschnitt so gelegt, dass die Aenderungen der Concentrationen, welche in der Umgebung der Elektroden stattfinden, diesen Querschnitt nicht erreichen, und bestimmt man vor und nach dem Durchgang des Stromes die Bestandtheile auf beiden Seiten des Querschnittes, so findet man eine Vermehrung einerseits des positiven, andererseits des negativen Bestandtheiles. Diese Zuwüchse entsprechen den durch den Querschnitt getriebenen Mengen der beiden Bestandtheile. Die Ueberführungszahl n des Anions bedeutet die durch den Querschnitt gegangene Anzahl der Molecüle (Aequivalente) des Anions im Verhältniss zu der gleichzeitig zersetzten Anzahl der Molecüle des Elektrolyts.

Bezeichnet man mit k die Geschwindigkeit des Kations, mit a die des Anions, so ist also:

$$n = \frac{a}{k+a}, \quad 1 - n = \frac{k}{k+a}, \quad \frac{1-n}{n} = \frac{k}{a}.$$

Fig. 463.



Hittorf hat gezeigt, dass n eine von der Stromstärke unabhängige Constante ist, welche aber mit der Concentration wechselt. F. Kohlrausch unterzog die für verdünnte Lösungen erhaltenen Ueberführungszahlen einer theoretischen Discussion, welche für die Theorie der Elektrolyse, sowie für die der Constitution der Lösungen von grosser Wichtigkeit ist*). Da wir uns auf dieses chemische Gebiet hier nicht weiter einlassen können, so geben wir nur noch eine von F. Kohlrausch**) nach Hittorf's und Kuschel's Messungen hergestellte graphische Darstellung der Weglängen der Ionen verschiedener Elektrolyte, Fig. 463.

Man denke sich zwei vertical unter einander liegende Stück-

*) Wiedem. Ann. VI, 145 (1879).

**) F. Kohlrausch: „Die gegenwärtigen Anschauungen über die Elektrolyse von Lösungen." Berlin 1887, S. 7.

chen der oberen und der unteren Begrenzungslinie der Figur als Anode und Kathode, dazwischen eine Säule von der Höhe der Figur, gefüllt mit einer Flüssigkeit von der Molecularconcentration m, welche der beigeschriebenen Zahl entspricht. Diese Zahl m ist gleich dem Gehalt eines Liters an Grammen, dividirt durch das Moleculargewicht des Elektrolyts. Dabei werden zweiwerthige Molecüle mit dem halben Moleculargewicht gerechnet. Es bedeutet also z. B. für Schwefelsäure, deren halbes Moleculargewicht $\frac{98}{2} = 49$ ist, der Abscissenpunkt $m = 4$, dass es sich um eine Flüssigkeit handelt, welche per Liter 4mal 49 = 196 g H_2SO_4 enthält. Für Kochsalz, NaCl, dessen Moleculargewicht = 58,36, bedeutet $m = 3$ eine Lösung, welche $3 \times 58{,}36 = 175{,}08$ g im Liter enthält. Jeder Elektrolyt ist nun in der Figur durch eine Curve charakterisirt, welche folgende Bedeutung hat. Sucht man auf der Abscisse zunächst den Moleculargehalt der Lösung auf, und zieht dann eine Senkrechte durch die ganze Figur, so wird diese durch die Curve in eine obere und untere Strecke getheilt. Die untere Strecke giebt dann den Weg des negativen Bestandtheiles (des Anions), die obere Strecke den gleichzeitigen Weg des positiven Bestandtheiles (des Kations). Zwei gleichzeitig von den Elektroden ausgehende Molecüle des Anions und des Kations würden sich also an der Curve begegnen. Die Figur zeigt also z. B., dass in einer Lösung von Chlorkalium oder Chlorammonium beide Ionen nahe gleich schnell wandern und zwar bei allen Concentrationen; dass beim salpetersauren Silber mit wachsender Concentration der Weg des Kations (Ag) sich vergrössert, der des Anions (NO_3) verkleinert; endlich, dass der Wasserstoff der Säuren eine bis fünfmal grössere Geschwindigkeit besitzt als der negative Bestandtheil.

163 **Mechanische Ueberführung der Flüssigkeiten vom positiven zum negativen Pole.** Wie beim galvanischen Flammenbogen vorzugsweise ein Ueberströmen vom positiven zum negativen Pole stattfindet, so zeigt sich auch beim Durchgange des Stromes durch Flüssigkeiten eine Tendenz, dieselben gegen den negativen Pol hinzutreiben. Wenn man die Biegung des Rohres, Fig. 462, durch einen Pfropf von feuchtem Thon verschliesst, wenn man alsdann beide Schenkel zu gleicher Höhe mit nahezu reinem Wasser füllt und in dasselbe die Polplatten einer Säule von ungefähr 6 bis 10 Bunsen'schen Bechern eintaucht, so ist zwar wegen der schlechten Leitungsfähigkeit des Wassers die Gasentwickelung unbedeutend, dagegen findet ein bedeutendes Sinken des Wassers im positiven und ein entsprechendes Steigen im negativen Schenkel statt. Ebenso wie beim Wasser beobachtet man dieses Ueberführen zum negativen Pole auch bei einer Lösung von Kupfervitriol.

Weingeist zeigt diese Erscheinung noch stärker als reines Wasser.

Es ist vortheilhaft, statt des Thonpfropfens eine Scheidewand von gebranntem porösem Thon anzuwenden, was am einfachsten in folgender

Weise geschieht: Auf den kürzeren Schenkel einer gebogenen Glasröhre *ab*, Fig. 464, wird eine möglichst genau passende kleine Thonzelle aufgekittet, und zwar so, dass der Boden der Thonzelle auf dem Ende des Glasrohres aufsitzt. Ueber die Thonzelle wird dann eine zweite etwas weitere, aber gleichfalls wieder möglichst genau passende Glasröhre aufgekittet und zwar mit Siegellack, wenn der Apparat für wässerige Flüssigkeiten, mit Hausenblase, wenn er für Weingeist dienen soll, immer aber so, dass der Boden des Thonzellchens rein bleibt.

Man hat diese Ueberführung der Flüssigkeit durch die poröse Thonwand als elektrische Endosmose bezeichnet.

Um die Menge der zum negativen Pole übergeführten Flüssigkeit genau zu messen, hat Wiedemann den Apparat Fig. 465 construirt: Auf einen unten geschlossenen porösen Thoncylinder war oben eine kleine

Fig. 464.

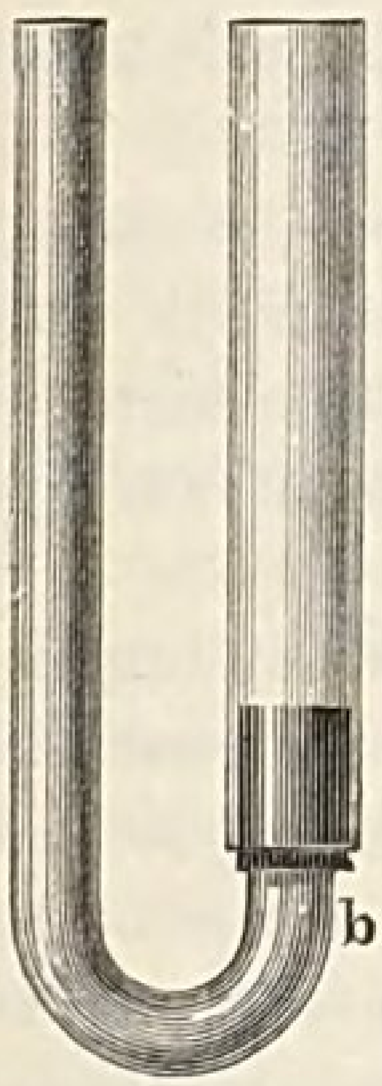
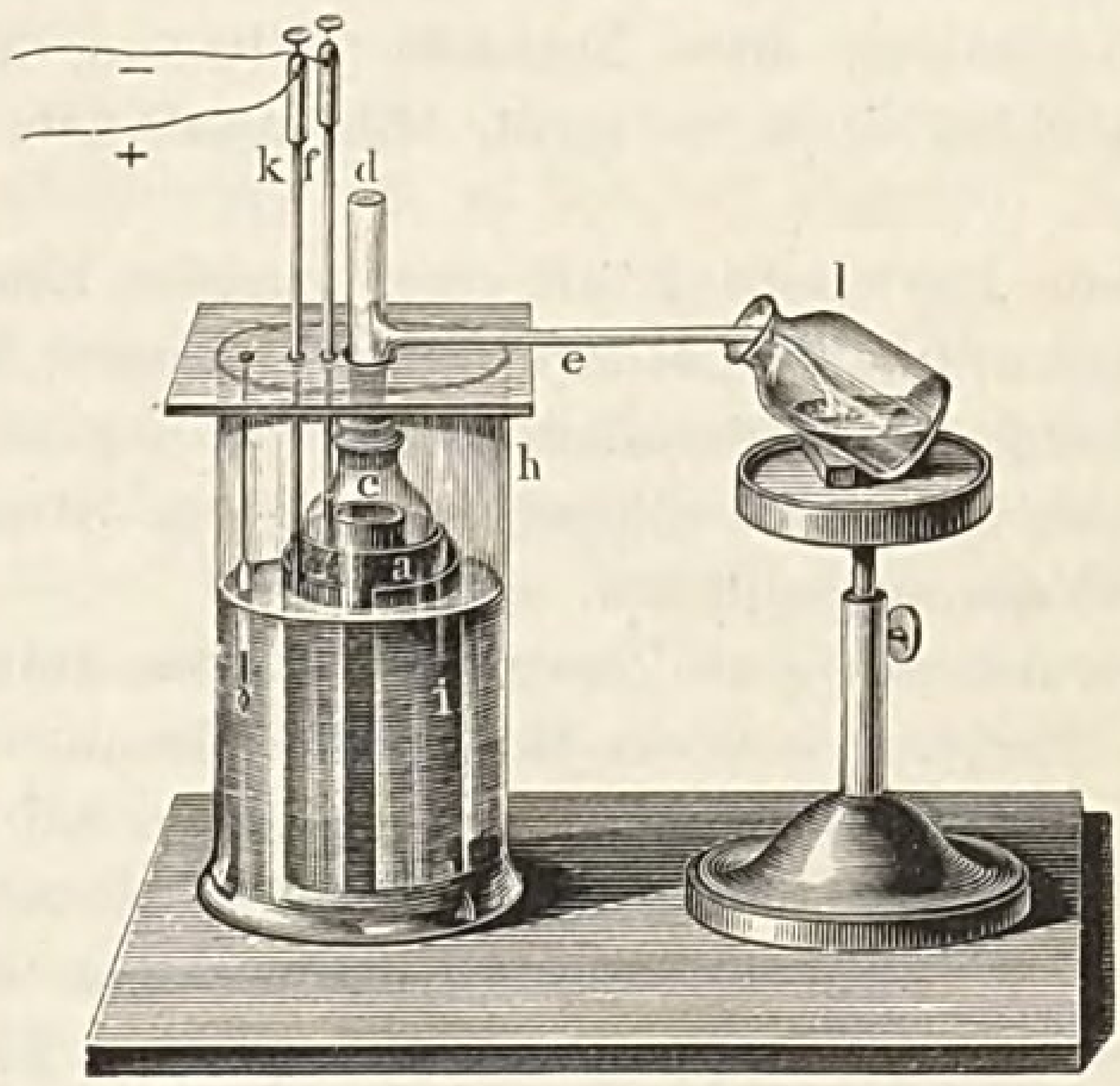


Fig. 465.



tubulirte Glasglocke gekittet, in deren Oeffnung ein perpendiculäres Rohr *d* mit seitlichem Ausflussrohr *e* eingesetzt war. Innerhalb des Thoncylinders stand ein Cylinder *c* von Kupfer- oder Platinblech, von welchem ein Draht *f*, luftdicht in die Wand der Glasglocke eingefügt, zum negativen Pol der Säule führte. Ausserhalb war der Thoncylinder von einem zweiten mit dem positiven Pole verbundenen Blechcylinder *i* umgeben. Der ganze Apparat stand in einem weiteren Glascylinder *h*, welcher, wie auch das Innere des Thoncylinders, mit Wasser oder einer anderen Flüssigkeit gefüllt war. Die Stromstärke wurde an einem Galvanometer gemessen.

Bei einer solchen mit Wasser angestellten Versuchsreihe ergab sich in $^1/_4$ Stunde die Ueberführung von 13,26 g für eine Stromstärke 10,8, während sich für die fast gleiche Stromstärke 10,6 in gleicher Zeit nur eine Ueberführung von 2,48 g ergab, als der Apparat mit einer Lösung von Kupfervitriol gefüllt war.

Die wichtigsten Gesetze dieser Ueberführung sind nach Wiedemann's Untersuchungen folgende:

1. Für eine und dieselbe Flüssigkeit ist die in gleichen Zeiten auf die Seite des negativen Pols übergeführte Flüssigkeitsmenge der Stromstärke proportional.

2. Unter sonst gleichen Umständen ist die Ueberführung der Flüssigkeit zum negativen Pole um so bedeutender, je grösser der Leitungswiderstand der Flüssigkeit ist.

Selbst für gut leitende Flüssigkeiten hat Wiedemann eine solche mechanische Ueberführung zum negativen Pole nachgewiesen. Wenn in dem Apparate, Fig. 454, S. 555, das untere Ende des in das negative Gefäss herabhängenden Rohres durch eine poröse Thonplatte verschlossen wird, und man den Strom mehrere Stunden lang durch den mit verdünnter Schwefelsäure gefüllten Apparat gehen lässt, so findet eine Vermehrung der Flüssigkeit im negativen Glase statt. Bei einem derartigen Versuche betrug diese Zunahme 0,49 ccm, als das specifische Gewicht der Mischung 1,06 war; für ein specifisches Gewicht 1,04 betrug sie 1,02 ccm.

Ohne Dazwischenkunft einer porösen Scheidewand, welche ein Zurückfliessen in das positive Gefäss hindert, kann natürlich eine solche Vermehrung der Flüssigkeitsmenge im negativen Gefässe nicht eintreten, weil sonst jede Ueberführung durch den Strom sogleich auf hydrostatischem Wege ausgeglichen wird.

Die im vorigen Paragraphen betrachteten Erscheinungen, welche bei der Elektrolyse einer Kupfervitriollösung auftreten, liessen sich nach Wiedemann's Ansicht so erklären, dass bei der Elektrolyse des Kupfervitriols SO_3 und O von einem Kupfertheilchen zum anderen gegen den positiven Pol hin fortwandern, ohne dass die Kupferatome von ihrer Stelle weichen, was für den Fall kupferner Elektroden eine Zunahme der Concentration am + Pol bewirkt; dass aber alsdann durch die mechanische Wirkung des Stromes ein Theil der concentrirteren Lösung aus dem positiven Gefässe in das negative übergeführt wird, wogegen durch die hydrostatische Ausgleichung die weniger concentrirte Lösung in das positive Gefäss zurückkommt. Näheres hierüber in dem mehrfach citirten Werke Wiedemann's.

164 **Theorie der Elektrolyse.** Die Erklärung der Elektrolyse gehört unstreitig zu den schwierigsten Aufgaben der Physik und ist bis heute, trotz der Versuche vieler Chemiker und Physiker, wie Berzelius, Grotthuss, Davy, De la Rive, Ampère, Fechner, Kohlrausch, Schönbein, Magnus, Clausius, Hittorf, Wiedemann, Quincke u. A., noch immer nicht zu einem ganz befriedigenden Abschlusse gelangt.

Wir haben oben im §. 155 über die Grotthuss'sche Vorstellungsweise. welche bis vor Kurzem noch als die verbreitetste angesehen werden

konnte, das Wesentlichste mitgetheilt. Fassen wir nochmals die Zersetzung eines Elektrolyten, z. B. der concentrirten Salzsäure, ins Auge. Die einzelnen Molecüle ordnen sich nach der Grotthuss'schen Vorstellungsweise zwischen den Elektroden wie folgt:

$$+\ \overset{-\ +}{\mathrm{Cl\,H}}\ \overset{-\ +}{\mathrm{Cl\,H}}\ \overset{-\ +}{\mathrm{Cl\,H}}\ \overset{-\ +}{\mathrm{Cl\,H}}\ \overset{-\ +}{\mathrm{Cl\,H}}\ -$$

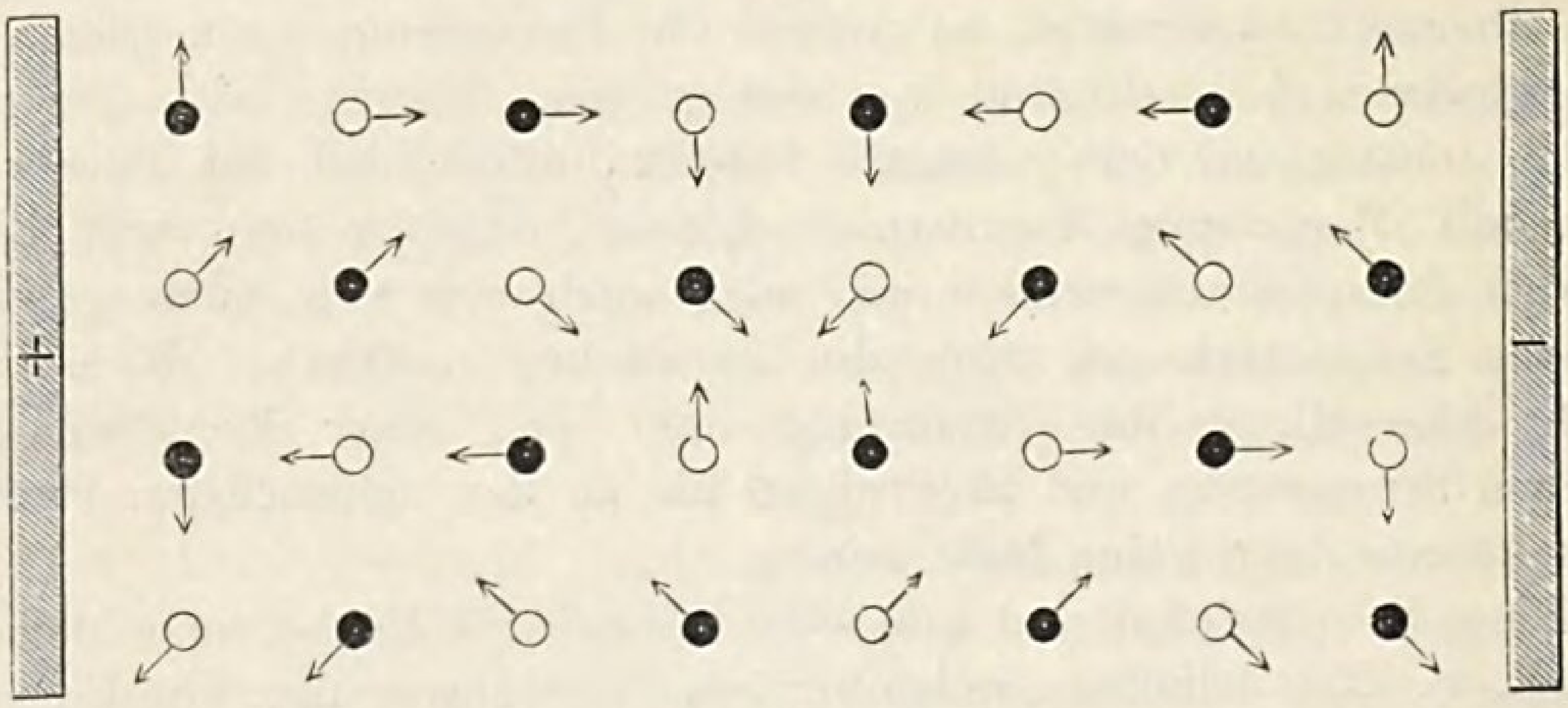
Soll nun die Zersetzung beginnen, so muss die Anziehung von Seite der + Elektrode auf das erste Cl-Atom grösser sein, als die Anziehung dieses Atoms durch das H-Atom. So lange dies nicht der Fall ist, könnte die Zersetzung offenbar nicht beginnen. Ist die Anziehungskraft aber einmal erreicht, so müsste die Zersetzung auch gleich mit einer gewissen Lebhaftigkeit vor sich gehen. Es wäre also gar nicht möglich, dass schon der geringste Potentialunterschied der Pole einen Strom mit Zersetzung hervorrufen könnte, sondern erst von einem gewissen Potentialunterschiede an, also auch erst von einer gewissen kleinsten Stromstärke an wäre die Zersetzung möglich. Dies widerspricht aber direct der Erfahrung; denn von einer Proportionalität zwischen Stromstärke und Elektrolyse bis zu den schwächsten Strömen hinab könnte dann keine Rede sein.

Diese Schwierigkeit hat nun aber Clausius (Mechanische Behandl. d. Elek. S. 154) behoben, indem er jene Vorstellung über die Constitution der Flüssigkeiten zu Grunde legte, zu welcher ihn die kinetische Theorie der Aggregatzustände geführt hat, eine Vorstellung, nach welcher die Molecüle eines Elektrolyten nie in Ruhe sind, auch wenn noch kein Strom hindurchgeht. Vielmehr ist stets ein Theil derselben im Zerfall begriffen, während andere durch Wiedervereinigung der Bestandtheile neu gebildet werden. Zu einer ähnlichen Vorstellung wurde früher schon Williamson durch chemische Betrachtungen geführt und ist auch auf anderem, unabhängigem Wege der Verfasser dieses Buches geführt worden, als er seine Theorie der Dissociation und der reciproken Reactionen aufstellte*). Die Molecüle des Elektrolyten, sowohl die unzersetzten als die bereits zersetzten, sind in fortschreitender Bewegung nach allen Seiten begriffen. So lange nun kein Strom geht, überwiegt keine dieser Richtungen, es vertheilen sich daher die Bestandtheile in durchaus gleichförmiger Weise durch die ganze Masse. Sobald aber ein Strom geht, addirt sich zu jeder Bewegung eines elektropositiven Bestandtheils eine Componente in der Richtung des positiven Stroms und ebenso eine Componente in der Richtung des negativen Stroms zu jeder Bewegung eines elektronegativen Bestandtheils. Wir wollen diese Erklärung durch ein rohes Bild etwas klarer zu machen versuchen. Fig. 466 (a. f. S.) stelle ein zwischen den Elektroden befindliches Flüssigkeitsquantum vor. Unter den zahllosen momentan unzerzetzten Molecülen derselben finden sich eine Anzahl momentan zersetzter Molecülbestandtheile vor, und zwar gleich viel

*) Beiträge zur chemischen Statik. Poggend. Ann. CXXXI (1867).

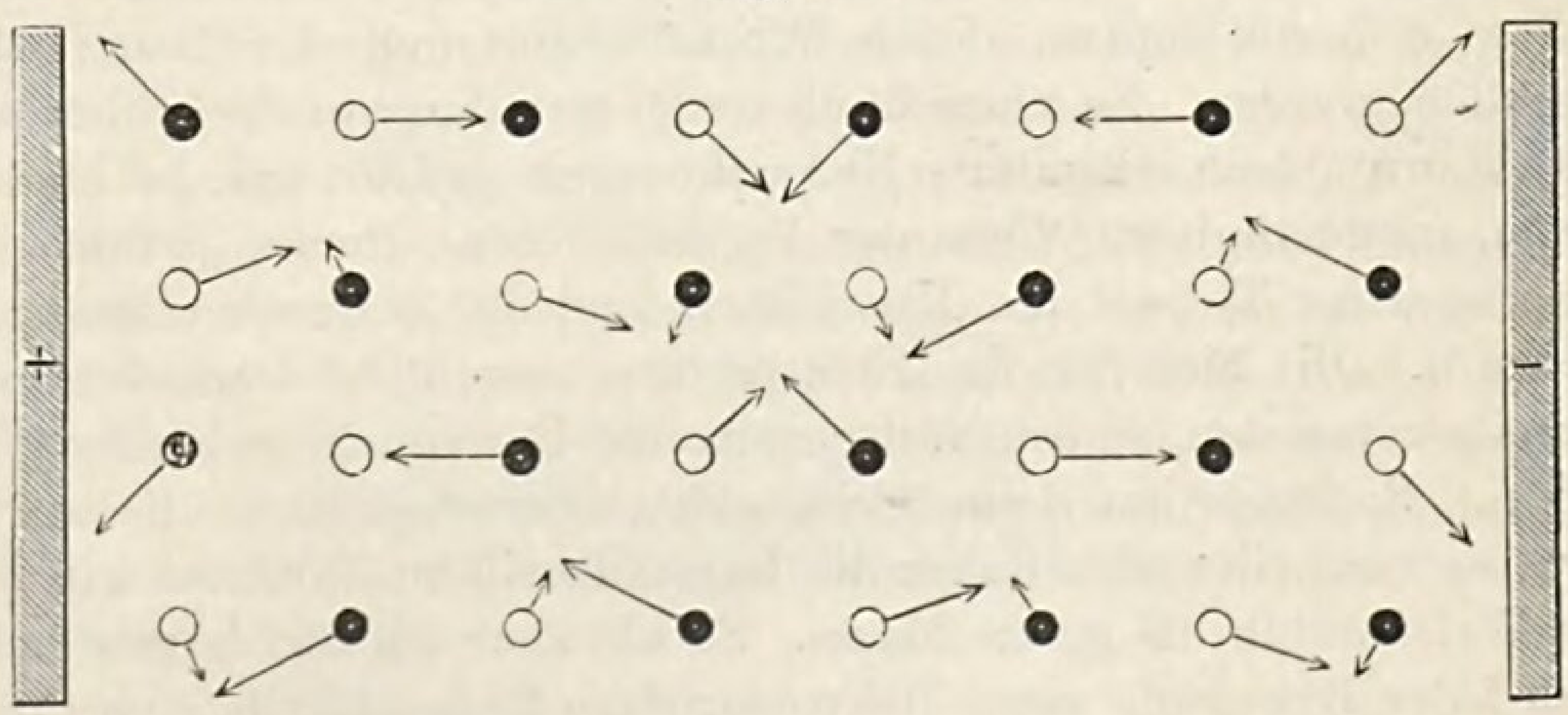
von beiderlei Art. Dieselben sind zwar regellos, aber doch in der Art in der ganzen Masse vertheilt, dass in jedem messbaren Raume eine gleiche Anzahl beider Arten vorkommen. Auch die Bewegungsrichtungen und durchschnittlichen Geschwindigkeiten sind gleich vertheilt. In Fig. 466 sind nur diese Molecülbestandtheile gezeichnet, die unzersetzten Molecüle weggelassen. Es ist ferner der Einfachheit wegen angenommen, dass alle Geschwindigkeiten gleich gross seien, und es sind nur acht Hauptrichtungen als Repräsentanten gezeichnet. Die angesetzten

Fig. 466.



Pfeile stellen die Grösse und Richtungen dieser Geschwindigkeiten vor. So lange nun kein Strom geht, kann es nicht zu einer vorherrschenden

Fig. 467.



Anhäufung der einen oder anderen Art der Molecülbestandtheile kommen, dieselben werden also immer wieder Gelegenheit finden, einer gleich grossen Anzahl der anderen Art zu begegnen und sich mit denselben wieder zu vereinigen, während ebensoviel gleichzeitig durch Zerfall wieder frei werden.

Geht nun aber ein Strom, so ändert sich der Sachverhalt; die positiv elektrischen Molecülbestandtheile, welche wir in der Zeichnung durch helle Kreisflächen darstellen, erhalten einen Zuwachs von Geschwindigkeit in der Richtung des positiven Stromes, die negativen, schwarz

gezeichneten, ebenso in der Richtung des negativen. Hierdurch werden die Bewegungszustände in der Weise modificirt, wie es Fig. 467 andeutet. In dieser Zeichnung ist angenommen, dass die in der Stromrichtung hinzu kommende Geschwindigkeitscomponente ebenso gross sei, wie die vorher nach allen Richtungen schon vorhandene, was natürlich nur eine specielle Annahme ist. Die ursprünglich schon nach rechts bewegten positiven Theile haben dann eine doppelte Geschwindigkeit nach rechts. Die ursprünglich nach links bewegten positiven Theile stehen still, die senkrecht zur Stromrichtung bewegten erhalten eine unter 45° zur Stromrichtung geneigte Richtung, die vorher unter 45° zur Stromrichtung geneigten nähern sich dieser Richtung und erhalten entsprechenden Zuwachs der Geschwindigkeit u. s. f. Dasselbe gilt für die negativen bezüglich der Bewegung nach links. Daraus resultirt eine überwiegende Bewegung der positiven Theile in der Richtung des positiven und ebenso eine der negativen Theile in der Richtung des negativen Stroms. Längs der Strombahn zwischen den Elektroden bleiben deshalb die Bestandtheile beiderlei Art gleich häufig, ist also keine Veranlassung vorhanden, die Anzahl der Zersetzungen gegenüber der Anzahl der Rückverbindungen zu vermehren, die Flüssigkeit bleibt also im Ganzen unverändert. Nicht so in der Nähe der Elektroden. An der positiven Elektrode häufen sich die negativen Bestandtheile, sie finden daselbst nicht mehr die gleiche Anzahl positiver Bestandtheile. Die Anzahl der Wiedervereinigungen wird daher geringer, es sammelt sich ein Ueberschuss negativer Bestandtheile bleibend an. Ebenso sammelt sich ein Ueberschuss positiver Bestandtheile an der negativen Elektrode. Es ist jedoch nicht nöthig, dass die beiderlei Arten der Bestandtheile durch die hinzutretende Kraft des Stromes in der Stromrichtung mit gleicher Geschwindigkeit bewegt werden, es ist vielmehr erwiesen, dass diese Geschwindigkeit ungleich ist, so dass also durch irgend einen Querschnitt mehr positive Theile nach rechts als negative nach links gehen können. Die Stromstärke wird nur durch die algebraische Summe der in der Zeiteinheit durch den Querschnitt gehenden Theile bestimmt, so zwar, dass negative, in der negativen Stromrichtung gehende ebenso wie positive in der positiven Stromrichtung gehende als positiv, dagegen negative in der positiven Stromrichtung gehende, sowie positive in der negativen Stromrichtung gehende als negativ gezählt werden.

Die eben skizzirte Theorie ist nun in Uebereinstimmung mit der Erfahrung. Einmal erklärt sie, dass die elektrolytische Wirkung nicht erst von einer bestimmten Stromstärke an beginnt, sondern dass schon der geringste Strom an den Elektroden zur Zersetzung Anlass giebt. Sie erklärt auch den Umstand, dass die Leitungsfähigkeit der Flüssigkeiten mit der Temperatur zunimmt, weil dadurch die moleculare Geschwindigkeit und unter Umständen auch die relative Anzahl der Theilmolecüle wächst; sie erklärt die Abhängigkeit der Leitungsfähigkeit von der Concentration. Die grössere Anzahl der zersetzbaren Molecüle muss

bis zu einer gewissen Höhe der Bewegung der Elektricität günstig sein. Die Vermehrung der Molecüle kann derselben aber durch die zahlreichen Begegnungen wiederum hinderlich sein, woraus sich nach F. Kohlrausch erklärt, dass das Leitungsvermögen nicht proportional, sondern verzögert wächst mit dem Moleculargehalte der Lösung. Dieser Einfluss kann sogar bei manchen Lösungen zu einem Maximum der Leitungsfähigkeit für gewisse Concentrationen führen (§. 139).

Ganz insbesondere wird aber dadurch erklärlich, dass konstante, innerhalb der angewendeten Temperaturen nicht der Dissociation unterworfene chemische Verbindungen, z. B. Wasser, reine (nicht verdünnte) Säuren der Elektrolyse und damit der Leitung des Stroms nicht fähig sind, während Mischungen von Säuren und Wasser, sowie Lösungen, welche wir sämmtlich mehr oder weniger als in Dissociation begriffene chemische Verbindungen ansehen dürfen, leicht elektrolysirt werden und gut leiten. Darum ändert auch ein geringer Zusatz von Säure oder Salz zu Wasser, oder von Wasser zu Schwefelsäuremonohydrat das Leitungsvermögen relativ sehr stark, wie aus F. Kohlrausch's Messungen hervorgeht.

Endlich wollen wir, da uns für eine nähere Ausführung der Raum mangelt, noch anführen, dass nach den Untersuchungen von G. Wiedemann, Grotrian und F. Kohlrausch sich ergeben hat, dass der elektrolytische Widerstand, den die Molecüle bei ihrer Fortbewegung durch den Strom erleiden, von derselben Grössenordnung ist, wie der capillare Widerstand, der aus der Reibung in der Flüssigkeit stammt. Es steht also wohl nichts entgegen, die Elektrolyse als einen mechanischen Vorgang aufzufassen. Die Zersetzung erfolgt zunächst durch Dissociation, aus dem Elektricitätsgefälle (der Potentialdifferenz) stammt die Kraft, womit die zuvor zersetzten Theile der Molecüle nach entgegengesetzten Richtungen getrieben werden. Die sich bewegenden Molecültheile sind die Träger der Elektricitätsbewegung, vermitteln also den Strom; der Reibungswiderstand, den sie dabei finden, ist der Leitungswiderstand der Flüssigkeit. Diese Reibung ist demnach auch die Ursache der Wärmeentwickelung beim Durchgang des Stromes.

165 **Praktische Anwendungen der Elektrolyse.** Nachdem de la Rive bereits im Jahre 1836 darauf aufmerksam gemacht hatte, dass das auf der Kupferplatte eines Daniell'schen Bechers niedergeschlagene Kupfer von derselben ablösbar und ein mikroskopisch genauer Abdruck derselben sei, so kamen Jacobi und Spencer, wie es scheint fast gleichzeitig, auf den Gedanken, dies praktisch nutzbar zu machen, was denn auch den entschiedensten Erfolg hatte.

Jacobi nannte diese Methode, mittelst elektrolytisch niedergeschlagenen Kupfers den Abdruck einer beliebigen Form darzustellen, „Galvanoplastik“, ein Name, welcher allgemein adoptirt wurde.

Um einen galvanoplastischen Abdruck eines Gegenstandes zu erhalten, muss derselbe entweder von vornherein aus Metall bestehen oder mit

einer leitenden Oberfläche versehen werden. Gewöhnlich handelt es sich darum, eine positive Copie herzustellen. Man fertigt dann zuerst eine als Matrize dienende Form durch Abgiessen in Metalllegirungen, Gyps, Stearin oder am zweckmässigsten aus Guttapercha, indem man diese in durch Wärme erweichtem Zustande auf den zu vervielfältigenden Gegenstand mittelst einer Presse aufdrückt. Um ein Anhaften zwischen der Guttapercha und dem Original zu verhindern, wird letzteres mit einer feinen Graphitschicht überzogen. Die Presse wird erst nach vollständigem Erkalten der Guttapercha geöffnet.

Eine solche Form ist freilich nicht leitend; sie wird es erst dadurch, dass man die Fläche der Form, auf welcher sich das Kupfer absetzen soll, mit einer zarten Schicht von Graphit überzieht, welche mittelst eines weichen Pinsels aufgerieben wird. Diese Form wird sodann auf einem Bleistreifen befestigt, indem man sie mittelst mehrerer Kupferstifte, welche die leitende Verbindung zwischen der Graphitschicht und dem Bleistreifen herstellen, aufnietet. Der Bleistreifen selbst wird, so weit er eintauchen soll, mit Firniss bedeckt. Zur Reproduction in Kupfer senkt man sodann die Form als Kathode in eine schwach mit Schwefelsäure angesäuerte, gesättigte Lösung von Kupfervitriol und stellt als Anode in einem Abstande von 10 bis 15 cm eine Kupferplatte gegenüber. Die Stromstärke regulirt man auf etwa 2,6 Amp. per Quadratdecimeter Elektrodenfläche, wobei man per Stunde und Quadratdecimeter 3 g Kupferniederschlag erhält. Für sehr feine Arbeiten (Kupferstichplatten) nimmt man den Strom schwächer bis zu 0,8 Amp. per Quadratdecimeter. Damit der Niederschlag von einer Kupferplatte sich leichter ablöse, wird dieselbe vorher schwach galvanisch versilbert. Soll der Abdruck als Druckplatte dienen, so wird vortheilhaft zuerst ein Nickelniederschlag und dann erst ein Kupferniederschlag erzeugt.

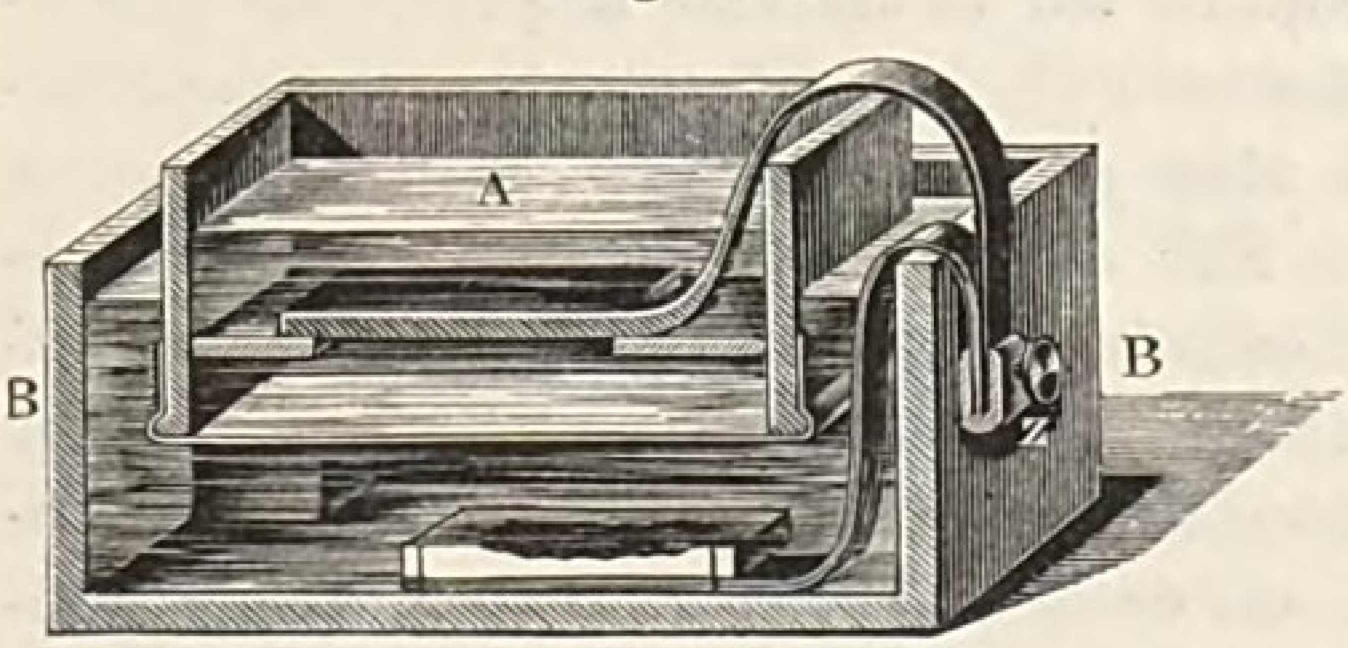
Es gelingt auf diese Weise, Holzschnitte oder Kupferstiche mit aller Schärfe des Originals zu vervielfältigen, wodurch es möglich wird, von einer und derselben Figur beliebig viele Abdrücke zu erhalten, ohne dass die späteren den früheren nachstehen. Die Holzschnitte dieses Werkes sind mit solchen Kupfertypen gedruckt.

Eine gestochene Kupferplatte hält bekanntlich nicht sehr viele Abdrücke aus, ohne bedeutend zu verlieren; die späteren Abdrücke sind immer schlechter als die ersten; daher der Werth der sogenannten *avant la lettre.* Dadurch ist der Stahlstich so sehr in Aufnahme gekommen, weil eine Stahlplatte ungleich mehr Abdrücke aushalten kann. Für die Kunst ist dies von entschiedenem Nachtheile, weil die Härte dieses Materials dem Künstler sehr grosse technische Schwierigkeiten entgegensetzt, welche es ihm unmöglich machen, auf Stahl ein so vollendetes Kunstwerk zu liefern, wie auf Kupfer. Nun hat man aber gelernt, selbst grosse Kupferplatten auf galvanoplastischem Wege zu vervielfältigen, und zwar so, dass die Abdrücke der Copien, deren man beliebig viele machen kann, denen der Originalplatte ganz gleich sind.

Zur Galvanoplastik im Grossen werden jetzt als Stromquellen eigene dynamoelektrische Maschinen angewendet. Bei Arbeiten in kleinerem Maassstabe verwendet man constante Elemente. Ja es ist nicht einmal durchaus nöthig, eine von der Stromquelle gesonderte Zersetzungszelle anzuwenden, indem die metallische Form selbst die Rolle des elektronegativen Metalls in einem einfachen Plattenpaare übernehmen kann. Fig. 468 stellt einen zu diesem Zwecke construirten Apparat dar. Ein Gefäss *A*, welches oben offen ist, dessen Boden aber aus einer Schweins- oder Ochsenblase gebildet wird, ist so in ein weiteres Gefäss *B* eingesetzt, dass der Boden von *A* ungefähr 5 cm über dem Boden des Gefässes *B* sich befindet. Das Gefäss *A* wird mit stark verdünnter Schwefelsäure (ungefähr $^1/_{40}$ Schwefelsäure), das Gefäss *B* aber mit einer concentrirten Lösung von Kupfervitriol gefüllt. In die Flüssigkeit des oberen Gefässes wird dann eine amalgamirte Zinkplatte, in die Flüssigkeit des unteren Gefässes wird die aus einem elektronegativen Metalle bestehende Form eingesetzt.

Auf irgend eine Weise muss dafür gesorgt sein, dass die Zinkplatte in einiger Entfernung über der Blase gehalten wird, welche den Boden des Gefässes *A* bildet; ferner ist es gut, über der Blase ein Stück Leinen auszubreiten, damit Unreinigkeiten und Metallstückchen, welche von der Zinkplatte herabfallen, nicht mit der Blase in Berührung kommen.

Fig. 468.

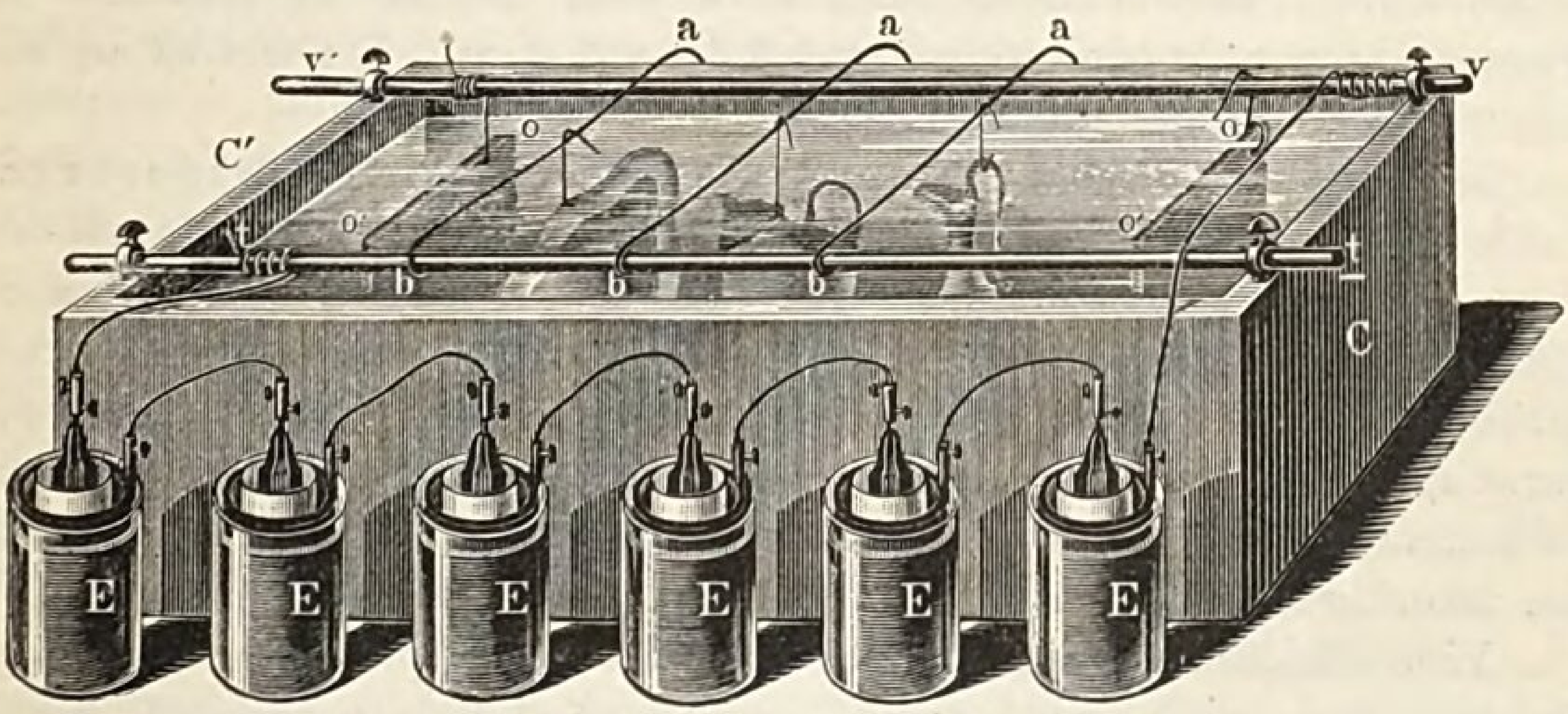


Die Zinkplatte ist mit einem Zinkstreifen versehen, welcher bei *z* durch eine Klemmschraube an einen Metallstreifen angedrückt wird, der zur elektronegativen Form führt.

Endlich hat Kobell in München ein mit dem Namen der Galvanographie bezeichnetes Verfahren angegeben, um in Tuschmanier gemalte Bilder durch Galvanoplastik zu vervielfältigen. Auf eine übersilberte Kupferplatte malt man mit einer Farbe, welche dadurch bereitet wird, dass man Oker oder Coaks mit einer Auflösung von Wachs in Terpentinöl anreibt und etwas Dammarafirniss zusetzt. Mit dieser Farbe malt man auf die Platte so, dass die hellsten Lichter frei bleiben und die Farbe um so dicker aufgetragen wird, je dunkler der Schatten sein soll. Sobald das Bild fertig gemalt ist, wird es mit Hülfe eines zarten Pinsels mit fein gepulvertem Graphit überzogen und dann in den galvanoplastischen Apparat eingesetzt. Allmälig schlägt sich das Kupfer auf die gemalte Platte nieder und bildet eine zweite Kupferplatte, auf welcher alle Lichtpartien der ersteren eben, die Schattenpartien aber vertieft sind; diese Platte liefert nun, wie eine gestochene Kupferplatte behandelt, Abdrücke, welche einer getuschten Zeichnung ähnlich sehen.

Ebenso, wie sich aus einer Auflösung von Kupfervitriol auf galvanischem Wege Kupfer am negativen Pole der Kette absetzt, ebenso setzen sich auch andere Metalle, wie Gold und Silber, aus einer geeigneten Auflösung am negativen Pole ab; darauf beruht die galvanische Vergoldung und Versilberung, zu deren Ausführung man eine Vorrichtung anwendet, wie sie in Fig. 469 dargestellt ist. Ueber einem Troge *CC'* sind zwei Metallstäbe *vv'* und *tt* befestigt, von denen der eine mit dem positiven, der andere mit dem negativen Pole der Säule in leitender Verbindung steht. Der Trog ist mit der Versilberungsflüssigkeit oder mit der entsprechenden Vergoldungsflüssigkeit gefüllt, in welche die beiden, mit der positiven Stange *vv'* in leitender Verbindung stehenden Silberplatten (Goldplatten) *oo'* hineinhängen. Diese Platten bilden also die positiven Elektroden. An den starken Drähten *ba*, welche mit dem negativen Stabe *tt* leitend verbunden sind, aber den Stab *vv'* nicht

Fig. 469.



leitend berühren dürfen, sind nun die zu versilbernden (oder zu vergoldenden) Gegenstände angehängt, welche, in die Flüssigkeit eintauchend, die negative Elektrode bilden.

Zur Erzeugung des Stromes dient eine Säule von 4 bis 6 Daniell'schen oder von 2 grossflächigen Bunsen'schen Bechern, bei Betrieb im Grossen ebenfalls eine dynamoelektrische Maschine. Eine Hauptbedingung für das Gelingen ist die grösste Reinheit der Oberfläche, insbesondere von Fett u. dergl.

Als Flüssigkeiten werden empfohlen*):

Zur Versilberung: Cyansilber gelöst in Cyankalium, verdünnt auf 5 bis 15° Beaumé. Man rechnet auf 1 Thl. Cyansilber 10 Thle. Cyankalium und 100 Thle. Wasser. Wird beim Gebrauche die Anode weiss, so muss Cyansilber, wird sie schwarz, muss Cyankalium zugesetzt werden. Die Anode soll während des Betriebes grau bleiben und erst

*) Von Uppenborn.

nach Stromunterbrechung weiss werden. Die Stromstärke sei etwa = 0,5 Amp. per Quadratdecimeter.

Zur Vergoldung für Silber, Kupfer und kupferreiche Legirungen eine Lösung, die bereitet wird, indem man 600 g krystallisirtes phosphorsaures Natron in 8 Liter warmem Wasser löst und mit einer Lösung von 10 g Chlorgold in 1 Liter Wasser mischt. Dieser Lösung wird dann noch eine Lösung von 100 g doppeltschwefelsaurem Natron und 10 g Cyankalium zugesetzt. Das Bad wird auf etwa 50⁰ angewärmt. Der Strom betrage 0,1 Amp. per Quadratdecimeter. Zur Vergoldung von Eisen und Stahl sind statt obiger Verhältnisse 500 g phosphorsaures Natron, 125 g doppeltschwefelsaures Natron, 5 g Cyankalium auf 10 g Chlorgold zu nehmen. Als Anode dient eine Gold- oder auch eine Platinplatte. Im letzteren Falle muss das Bad von Zeit zu Zeit durch Zusatz von Chlorgold und Cyankalium regenerirt werden.

Zur Vernickelung: Eine gesättigte Lösung von schwefelsaurem Nickeloxydul, welche durch Ammoniak stets neutral zu erhalten ist. Stromstärke per Quadratdecimeter 0,3 bis 0,6 Amp. Ein Gehalt an Kobalt macht den Ueberzug noch härter.

Die Niederschläge von Bleihyperoxyd und Manganhyperoxyd, welche sich aus den entsprechenden Metalllösungen auf der positiven Platte absetzen, zeigen oft die schönsten Farben, wenn die Schicht noch dünn genug ist. Nobili hat zuerst auf diesem Wege auf Metallplatten Farbenringe dargestellt, die nach ihm die Nobili'schen Ringe genannt werden. Man hat nun dieses Verfahren in neuerer Zeit sehr vervollkommnet und diese Farbenringe auch in der Praxis zur Verzierung von mancherlei Metallwaaren, z. B. von Tischglocken etc., angewandt.

Eine Bleilösung, aus welcher man besonders prachtvolle Farbenniederschläge erhält, wird nach Becquerel's Angabe bereitet, indem man fein gepulverte Bleiglätte in einer Aetzkalilösung, deren specifisches Gewicht ungefähr 1,8 ist, kocht. In diese Flüssigkeit wird nun die den positiven Pol einer Säule von ungefähr 6 Daniell'schen Bechern bildende Metallplatte eingetaucht, und ihr gegenüber der aus einem Platindraht oder einer kleinen Platinplatte bestehende negative Pol der Säule gehalten. Die Farben entwickeln sich sehr rasch. Am negativen Pol scheidet sich metallisches Blei ab.

Ein Metall, welches an und für sich von einer Säure oder irgend einer anderen Flüssigkeit angegriffen wird, kann dadurch, dass man es mit einem noch mehr elektropositiven Metall so in Berührung bringt, dass es den negativen Pol einer einfachen Kette bildet, vor dem Anfressen geschützt werden.

So wird, wenn eine Zink- und eine Kupferplatte sich in einer verdünnten Säure berühren, das Zink schneller, das Kupfer weniger schnell oxydirt, als es ausserdem der Fall sein würde. Für dieses Princip geben die Versuche Davy's über die Erhaltung des Kupferbeschlages der Schiffe ein schönes Beispiel. Eine Kupferplatte, in Seewasser eingetaucht,

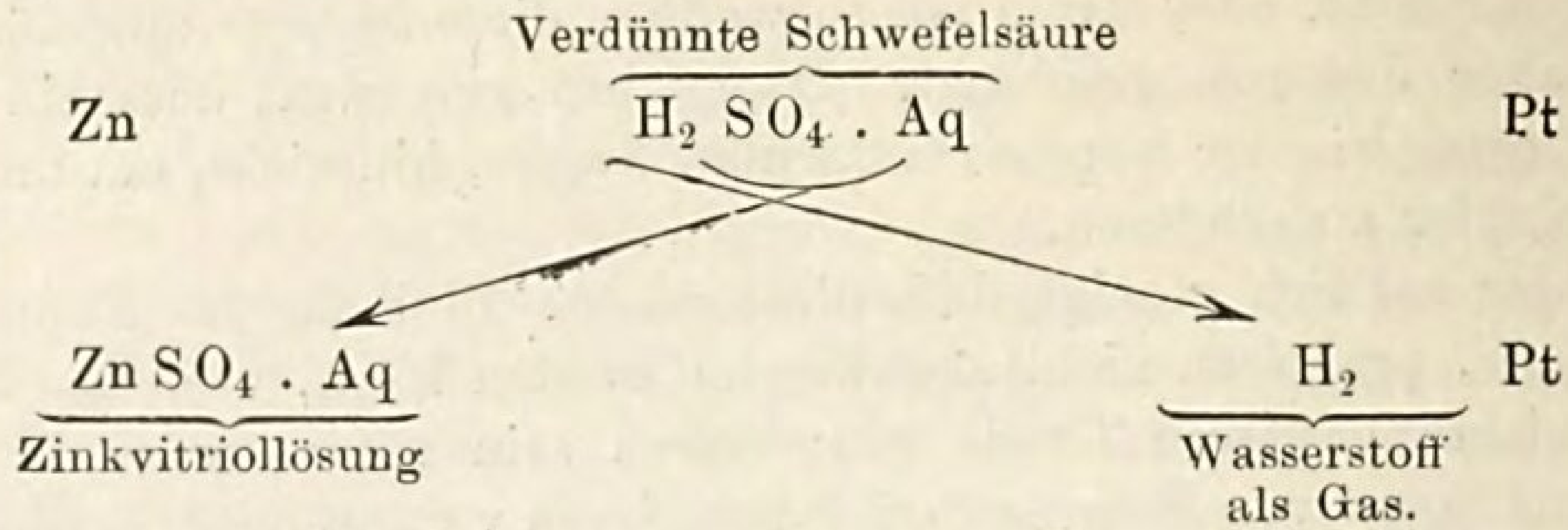
ist einem schnellen Anfressen unterworfen; wenn aber das Kupfer in Berührung mit Zink oder Eisen ist, so werden diese Metalle aufgelöst, das Kupfer aber dadurch geschützt. Davy hat gefunden, dass ein Stück Zink, so gross wie der Kopf eines kleinen Nagels, hinreicht, um ungefähr 9 qdm Kupfer zu schützen.

Leider hat sich gezeigt, dass diese schöne Methode, das Kupfer rein zu erhalten, praktisch nicht angewendet werden kann, weil das Kupfer bis zu einem gewissen Grade angefressen sein muss, wenn es nicht durch Anhängen von Seegras und Schalthieren verunreinigt werden soll.

Dasselbe Princip hat v. Althaus angewandt, um das Anfressen der eisernen Pfannen, in welchen die Salzsoole versotten wird, zu verhindern. Hier durfte aber das schützende Zink nicht in den Pfannen selbst angebracht werden, weil sonst das gebildete Chlorzink sich in der Salzlösung verbreitet hätte. Er schnitt deshalb die Ecken der Pfannen durch ein Brett ab und goss die so gebildeten Kammern, deren Boden durch die Eisenplatten gebildet wurde, mit Zink aus. So war das Zink mit dem Eisen in metallischer Berührung, und die Flüssigkeit sickerte in hinlänglicher Menge durch das Holz zum Zink durch, um die Kette zu schliessen; das gebildete Chlorzink konnte aber die Salzlösung nicht verunreinigen.

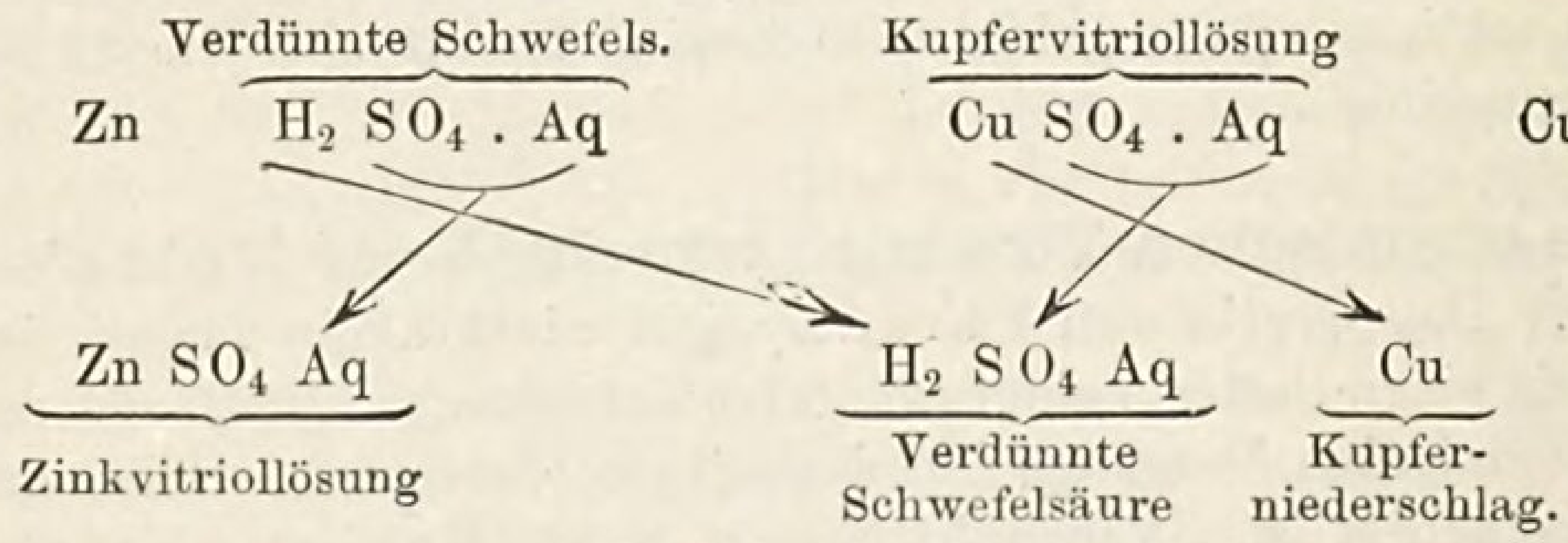
Die chemischen Vorgänge innerhalb der Volta'schen Ketten. 166 Das Gesetz von Faraday gilt nicht allein für die in den Stromkreis einer Batterie eingeschalteten Zersetzungszellen, sondern auch für die chemischen Vorgänge innerhalb jedes Elementes, welches an dem Strome betheiligt ist. Verbindet man z. B. ein Bunsen'sches Element mit einem Knallgasvoltameter und zugleich mit einem Kupfervoltameter, so finden in allen dreien gleichzeitig Reactionen in äquivalenten Mengen statt. In derselben Zeit, in welcher im Knallgasvoltameter 1 Gewichtstheil Wasserstoff entwickelt wird, werden im Kupfervoltameter 31,7 Gewichtstheile Kupfer an der Kathode gefällt und im Bunsen'schen Elemente 32,5 Gewichtstheile Zink gelöst, sowie eine äquivalente Menge Salpetersäure reducirt. Dabei wird nur vorausgesetzt, dass in den Elementen keine locale Wirkung stattfinde, d. h. dass im ungeschlossenen Element keine chemische Veränderung vor sich geht, was bei den gebräuchlichen Ketten mit gut amalgamirtem Zink wenigstens sehr annähernd zutrifft. Fände eine solche locale Wirkung statt, so würde die Quantität des aufgelösten Zinks grösser sein, als der äquivalenten Menge entspricht. Da nun der Strom 1 Amp. stets per Secunde ein elektrochemisches Aequivalent von jedem Elemente ausscheidet, so folgt, dass derselbe Strom von 1 Amp. per Secunde im Daniell- und im Bunsen-Elemente 0,3369 mg Zink auflöst, 0,010386 mg Wasserstoff entwickelt, in ersterem überdies 0,3280 mg Kupfer niederschlägt und im Bunsen-Elemente eine äquivalente Menge Salpetersäure reducirt. Könnten wir die locale Einwirkung der Säure auf das Zink ganz

Smee'sches Element.



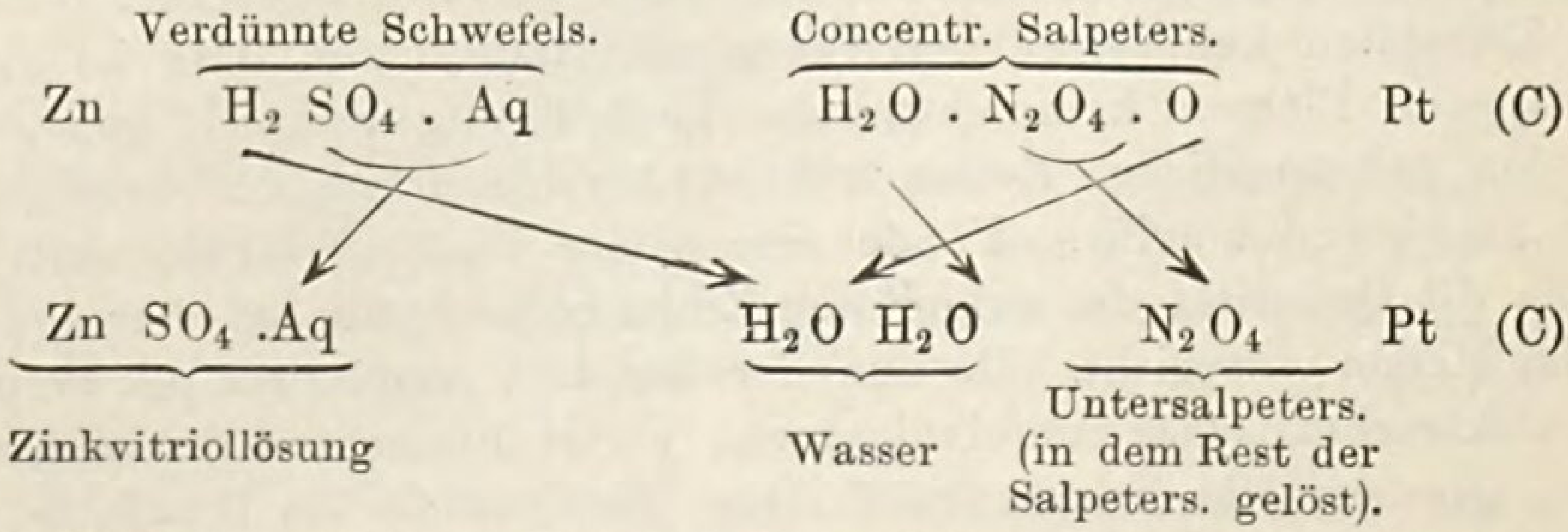
In Verbindung getretene Bestandtheile: . . .	Zn, O, SO_3 Aq	Calor. Effect =	+ 106 090 Cal.
Von einander getrennte Bestandtheile: . . .	H_2, O	„ „	— 68 360 „
		Totaler calor. Effect =	+ 37 730 Cal.

Daniell'sches Element.



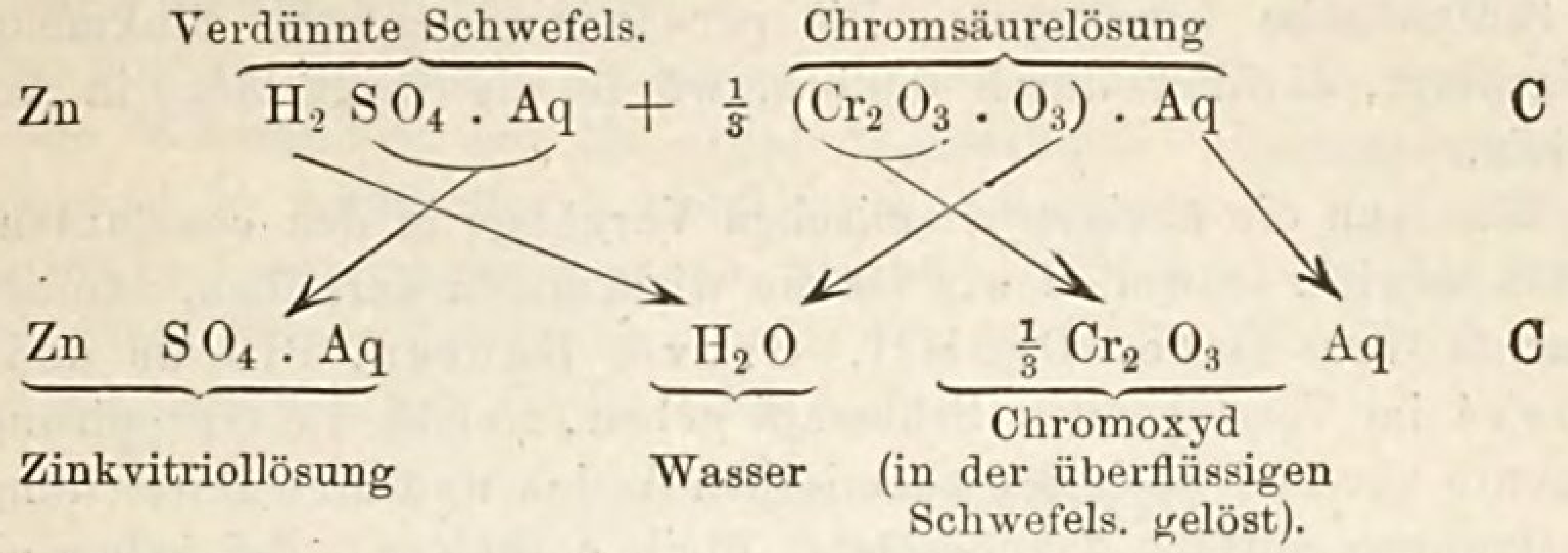
In Verbindung getreten:	Zn, O, SO_3 Aq	Calor. Effect =	+ 106 090 Cal.
Von einander getrennt:	Cu, O, SO_3 Aq	„ „ =	— 55 960 „
		Totaler calor. Effect =	+ 50 130 Cal.

Grove's (Bunsen's) Salpetersäure-Element.



In Verbindung getreten:	Zn, O, SO_3 Aq	Calor. Effect. =	+ 106 090 Cal.
Von einander getrennt wurden:	N_2O_4, O, H_2O	„ „ =	— 10 010 „
		Totaler calor. Effect =	96 080 Cal.

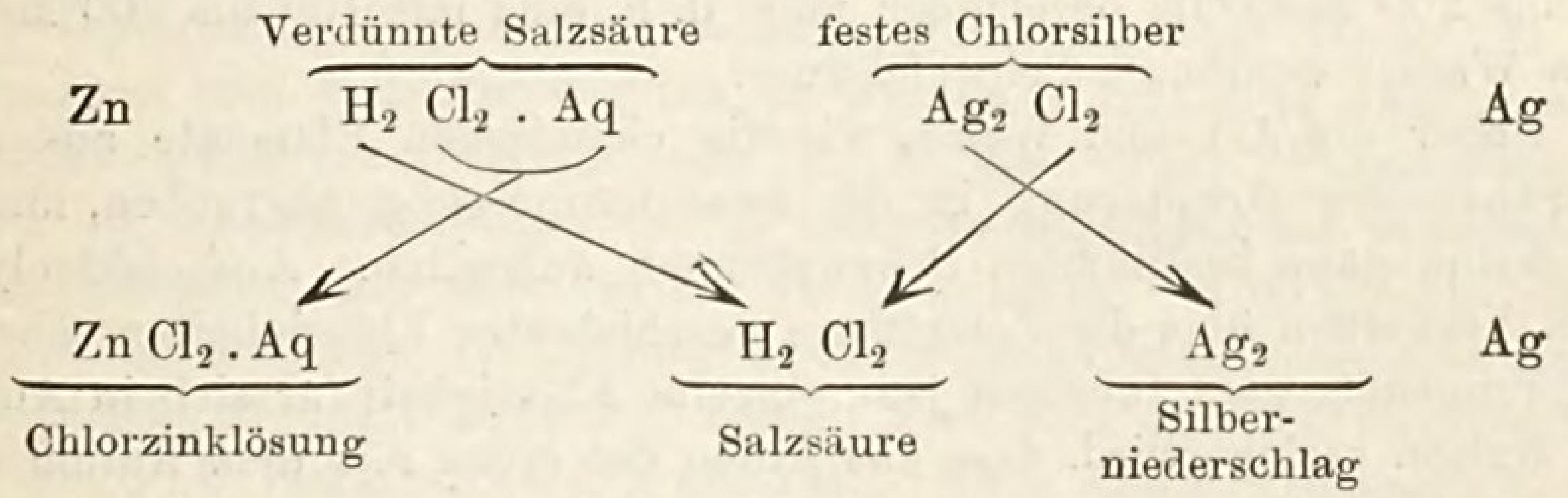
Bunsen's Chromsäure-Element.



In Verbindung getreten: Zn, O, SO_3 Aq Calor. Effect = + 106 090 Cal.
Von einander getrennt wurden: $\frac{1}{3}(Cr_2O_3 . O_3)$, Aq „ „ — 6 300 „

Totaler calor. Effect = + 99 790 Cal.

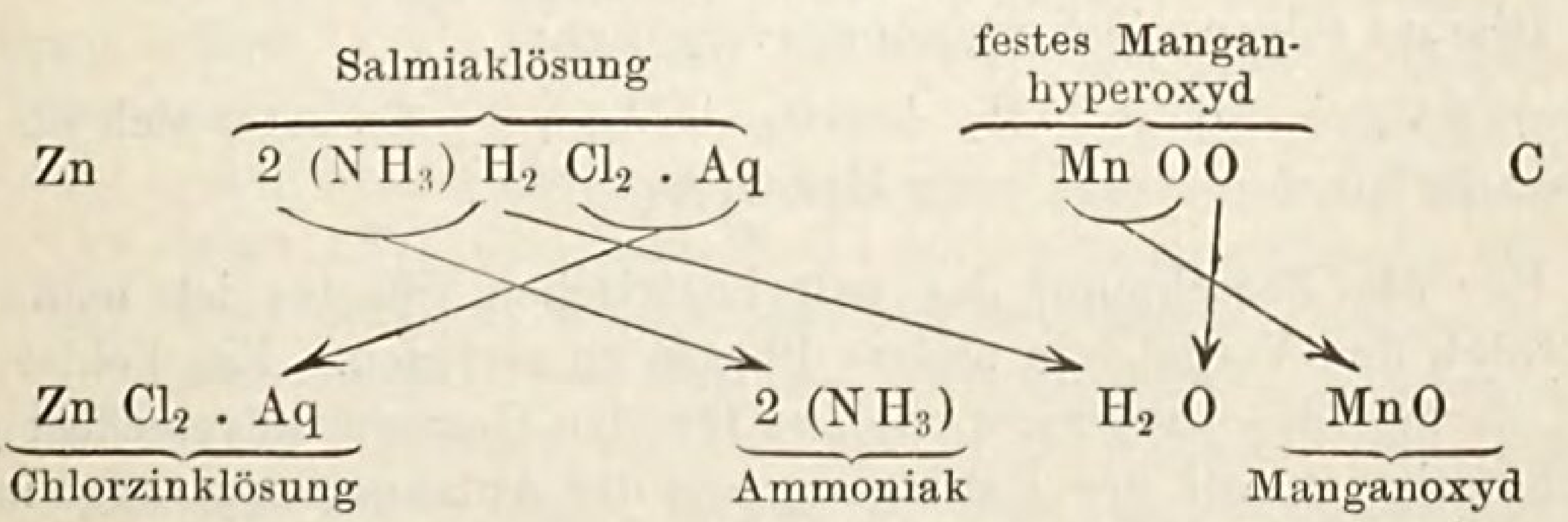
Pincus' Chlorsilber-Element.



In Verbindung getreten sind: Zn, Cl_2, Aq Calor. Effect = + 112 840 Cal.
Von einander getrennt wurden: Ag_2, Cl_2 „ „ — 58 760 „

Totaler calor. Effect + 54 080 Cal.

Léclanché's Element.



Die calorimetrischen Effecte dieses Elementes sind noch nicht genügend untersucht.

unterdrücken, so könnten wir aus dem Zinkverbrauch der Elemente die Stromstärke berechnen. Die per Secunde gelöste Zinkmenge in Milligramm, dividirt durch 0,6094, würde die Stromstärke in Ampère ergeben.

Was nun die übrigen chemischen Vorgänge in den constanten Elementen betrifft, so wollen wir für die wichtigeren derselben, nämlich die Elemente von Smee, Daniell, Grove, Bunsen, Pincus und Léclanché im Vorstehenden Schemata geben, welche die Gruppirung der Elemente vor und nach der chemischen Action und eine Darstellung der Umsetzungen mittelst dazugesetzter Pfeile enthalten. Bei jedem einzelnen Elemente fügen wie bei eine in der von Thomsen eingeführten Bezeichnungsweise ausgedrückte Zusammenstellung der durch die chemischen Vorgänge im Elemente bedingten Verbindungen und Zersetzungen sammt den zugehörigen calorimetrischen Effecten, da wir diese Werthe später gebrauchen werden. Das in der Schwefelsäure enthaltene oder sonst an der Reaction wesentlich theilnehmende Wasser ist durch H_2O, das nur als Lösungsmittel auftretende Wasser mit Aq bezeichnet. Demnach bedeutet z. B. $H_2SO_4 \,.\, Aq$ so viel wie $H_2SO_4 \,.\, x\, H_2O$, wo x 100 bis 200 Molecüle bezeichnen mag, d. h. eine mit 100 bis 200 Molecülen Wasser verdünnte Schwefelsäure.

Ueber die Art und Weise, wie die chemischen Elemente aus der ursprünglichen Gruppirung in die neue Gruppirung übergehen, lassen sich keine ganz bestimmten Behauptungen aufstellen. Aus elektrolytischen Versuchen über die Zersetzung geschichteter Flüssigkeiten scheint hervorzugehen, dass zunächst jede einzelne Flüssigkeit für sich in Anion und Kation zerlegt wird, dass das Anion der einen mit dem Kation der anderen beim Zusammentreffen sich vereinigt, während die anderen beiden Ionen den Elektroden zuwandern. Man kann sich demnach in analoger Weise den Vorgang im Daniell'schen Elemente so vorstellen:

Zuerst wird sowohl die verdünnte Schwefelsäure als die Kupfervitriollösung zersetzt und zwar nach den Gleichungen:

$$H_2SO_4 \,.\, Aq = \leftarrow SO_4 + Aq + H_2 \rightarrow \qquad Cu\,SO_4 \,.\, Aq = \leftarrow SO_4 + Aq + Cu \rightarrow$$

Hierauf folgen die Verbindungsvorgänge:

$$Zn + SO_4 + Aq = Zn\,SO_4\,Aq \qquad H_2 + SO_4 + Aq = H_2\,SO_4\,Aq$$

Cu setzt sich an Cu.

Für die Berechnung des calorimetrischen Effectes ist man aber genöthigt, den Vorgang in andere Phasen zu zerlegen. Ein Fehler entsteht daraus durchaus nicht, weil es für den Gesammtwärmeeffect ganz gleichgültig ist, wie der Uebergang aus der Anfangsgruppirung in die Endgruppirung stattfindet. In der Calorimetrie können wir mit dem Körper SO_4 nichts anfangen, weil er sich nicht frei darstellen lässt. Wir denken uns statt dessen zunächst die vorhandenen Verbindungen

in einfachere, wirklich in freiem Zustande darstellbare Theile zerlegt und dann daraus die Endgruppen zusammengesetzt. Also z. B.: Wir denken uns zuerst $CuSO_4Aq$ zerlegt in CuO und SO_3Aq. Der dazu gehörige Wärmeeffect ist die negativ gerechnete Lösungswärme von Kupferoxyd in verdünnter Schwefelsäure. Rechnen wir noch dazu die negative Verbrennungswärme von Kupfer, so haben wir den totalen Wärmeeffect für die Zerlegung von $CuSO_4Aq$ in Cu, O und SO_3Aq.

Jetzt beachten wir die Reaction

$$Zn + O + SO_3Aq = ZnSO_4Aq.$$

Wir erhalten ihren Wärmeeffect, indem wir die Verbrennungswärme des Zinks zur Lösungswärme des Zinkoxyds in verdünnter Schwefelsäure addiren. Damit ist der ganze Process vollendet. Sein totaler Wärmeeffect ist die algebraische Summe der Theileffecte. Auf ähnliche Weise sind auch bei den anderen Ketten die calorimetrischen Effecte zu erhalten.

Der Grad der Verdünnung ist nicht ganz ohne Einfluss auf das schliessliche Resultat, doch ist dieser Einfluss meistens so klein, dass wir hier davon absehen können.

Die totalen Wärmeeffecte beziehen sich natürlicher Weise auf Umsetzungen von Molecülgewichten in Grammen und sind nach Grammcalorien gemessen. Wenn also z. B. der totale Wärmeeffect des Daniell'schen Elementes = 50 130 Calorien angegeben ist, so heisst dies, dass (zunächst ohne allen Strom) die Umsetzung von 65 g Zink mit der äquivalenten Menge von Kupfervitriol in Zinkvitriollösung und Kupfer eine solche Menge Wärme frei werden lässt, dass dadurch 50130 g Wasser um 1° C. erwärmt werden könnten. Nach den Erklärungen in der Wärmelehre ist also diese Zahl 50130 identisch mit der Energiedifferenz, welche diesen Stoffen in ihrer Anordnung vor und nach der Umsetzung entspricht; oder mit anderen Worten: durch diese Umsetzung wird ein Energiequantum von 50 130 Einheiten frei.

Zusammenhang zwischen der Stromenergie und der chemischen Energie der Volta'schen Kette. H. v. Helmholtz hat, so viel uns bekannt, zuerst im Jahre 1847 in seiner denkwürdigen Schrift: „Die Erhaltung der Kraft", den Satz ausgesprochen, dass die gesammte in einem Stromkreise erzeugte Wärmemenge gleich jener sein muss, welche durch die chemischen Processe in der Kette frei wird. Im Jahre 1851 hat dann W. Thomson *) eine Theorie der galvanischen Kette gegeben, welche ebenfalls auf diesem Principe beruht. Neuere Untersuchungen von Raoult, Edlund und insbesondere die mit musterhafter Ausdauer und Umsicht an zahlreichen Combinationen angestellten Messungen von F. Braun **) haben aber unzweifelhaft dar- 167

*) W. Thomson, Phil. Mag. (4) II, S. 429 (1851).

**) Wiedem. Ann. V, S. 182 (1876); XVI, S. 561 (1882); XVII, S. 593 (1882).

gethan, dass dieser Satz nur unter speciellen Bedingungen, welche beim Daniell'schen Elemente allerdings sehr nahe zutreffen, richtig ist, dass aber im Allgemeinen die Energie des Stromes sowohl kleiner als auch grösser sein kann, als der Verbrauch potentieller Energie durch die gleichzeitig stattfindenden chemischen Vorgänge in der Kette.

Wir haben auf diesen Umstand bereits bei der Besprechung des Joule'schen Gesetzes hingewiesen, wollen hier aber näher hierauf eingehen.

H. v. Helmholtz*) hat inzwischen auf theoretischem Wege aus den beiden Hauptsätzen der mechanischen Wärmetheorie (Satz von der Erhaltung der Energie und Satz von der Vermehrung der Entropie) für die Wärmemenge q, welche man einem (nicht polarisirten) Elemente zuführen muss, um seine Temperatur constant zu erhalten, während der Strom J dasselbe durchströmt, den Ausdruck abgeleitet:

$$q = \alpha \vartheta \frac{dp}{d\vartheta} J \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 1)$$

worin bedeuten:

q Wärme in Grammcalorien,

α die Constante des Joule'schen Gesetzes (das Wärmeäquivalent der Arbeitseinheit, letztere gemessen nach Voltcoulomb) $= 0{,}2394$,

ϑ die absolute Temperatur des Elements $=$ der Celsiustemperatur mehr 273^0,

$\frac{dp}{d\vartheta}$ die Zunahme der elektromotorischen Kraft des Elementes per Grad Celsius,

J die Stromstärke in Ampère.

Dabei ist vorausgesetzt, dass der Widerstand des Elementes verschwindend klein neben dem äusseren Widerstande sei, so dass die nach dem Joule'schen Gesetze entwickelte Wärme ausserhalb des Elementes zur Erscheinung kommt.

Die Formel 1) gilt sowohl für fremden Strom, sowie für den, welchen das Element selbst producirt. Die Wärme q wird offenbar nur dann gleich Null, wenn $\frac{dp}{d\vartheta} = 0$; also wenn die elektromotorische Kraft sich mit der Temperatur nicht ändert. In diesem Falle wird also geradeauf die ganze verbrauchte chemische Energie in Stromenergie verwandelt, welche sich dann in Form von Stromwärme im Verhältnisse der Widerstände zwischen Element und Schliessungskreis vertheilt. Ist dagegen bei einem Elemente die elektromotorische Kraft bei höherer Temperatur ebenfalls höher, so producirt das Element stets mehr Stromenergie, als es chemische Energie verbraucht. Um das Deficit zu decken, muss von aussen Wärme zugeführt werden. Wenn

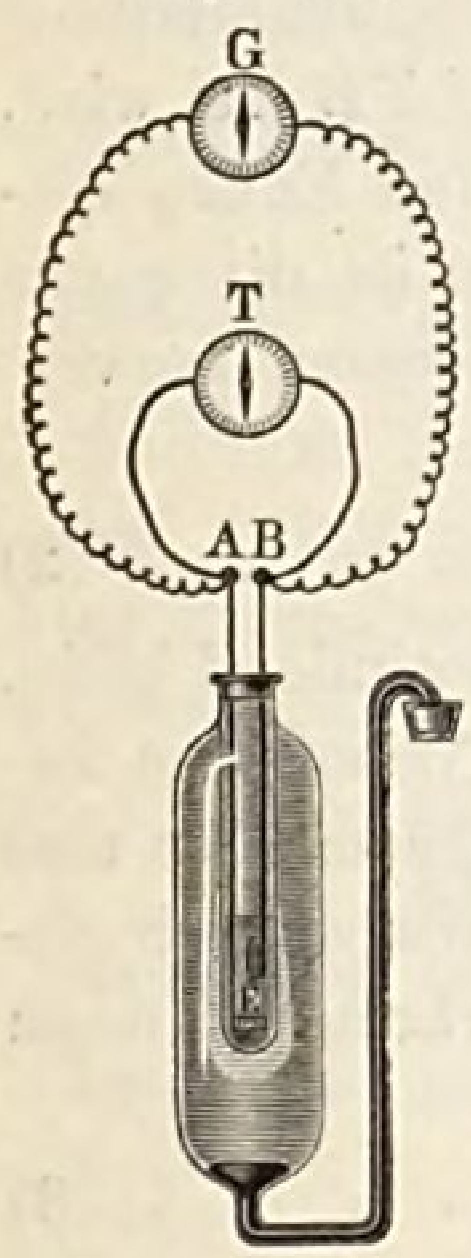
*) v. Helmholtz, Gesammelte Abhandl. II, S. 958.

keine Zufuhr von Wärme von aussen erfolgt, so wird der nöthige Wärmezuschuss aus dem Wärmevorrath des Elementes entnommen und es kann dann zu einer factischen Abkühlung des Elementes kommen, wenn nämlich der Antheil von Stromwärme, der auf den Widerstand des Elementes entfällt, nicht hinreicht, das Deficit zu decken.

Nimmt dagegen die elektromotorische Kraft des Elementes mit steigender Temperatur ab, so wird q negativ, d. h. das Element verbraucht durch seinen chemischen Process mehr potentielle Energie, als zur Bestreitung der Stromenergie erforderlich ist. Der Ueberschuss wird daher in Wärme verwandelt, welche nicht im Stromkreise vertheilt wird, sondern ausschliesslich im Element selbst zur Entwickelung kommt.

Diese theoretischen Folgerungen von v. Helmholtz sind zunächst von Czapski*) und von Gockel**) qualitativ bestätigt worden, indem sie an einer Anzahl von Elementen zeigten, dass die elektromotorische Kraft mit steigender Temperatur abnimmt, wenn die aus Thomsen's Zahlen berechnete chemische Energie grösser ausfällt, als die Joule'sche Stromenergie. Gockel hat auch für einige Elemente, welche unter Wärmeabsorption arbeiten, das Steigen der elektromotorischen Kraft mit der Temperatur constatirt.

Fig. 470.



Einen ganz befriedigenden quantitativen Nachweis hat dann für sechs verschiedene Elemente H. Jahn***) geliefert. Seine Methode war im Wesentlichen folgende: Das zu untersuchende, in kleinen Dimensionen ausgeführte Element E war in die Eprouvette eines Bunsen'schen Eiscalorimeters versenkt und, wie Fig. 470 in schematischer Zeichnung zeigt, durch isolirte Zuleitungsdrähte zunächst mit den beiden Punkten A und B verbunden. Diese beiden Punkte waren ausserdem durch zwei Kreise mit einander in Verbindung. Der engere Kreis von geringem Widerstande enthielt das Galvanometer T, der weitere Kreis von sehr grossem Widerstande das Galvanometer G. Dieser letztere Widerstand war so gross (über 200 000 Ohm), dass nur ein verschwindend kleiner Bruchtheil des Stromes J, welcher vom Elemente ausging, in den grösseren Kreis übertrat, so dass man also die am Galvanometer T gemessene Stromstärke als identisch mit der Stromstärke J im Elemente ansehen konnte. Das Galvanometer G diente zur Messung der Potentialdifferenz an den Punkten A und B. Zu diesem Behufe wurden die Scalenausschläge in G verglichen, einmal, während die Verbindung wie in der Fig. 470 hergestellt war, und dann während die Enden des grösse-

*) Wiedem. Ann. XXI, S. 209 (1884).
**) Ebend. XXIV, S. 618 (1885).
***) Ebend. XXVIII, S. 21 (1886).

ren Kreises bei A und B nur mit den Polen eines Clark'schen Normalelementes verbunden waren. Die Potentialdifferenz zwischen A und B im ersten Falle verhielt sich dann zur elektromotorischen Kraft des Normalelementes 1,433, wie die zugehörigen Scalenausschläge zu einander. Diese Potentialdifferenz bezeichnen wir mit $\varDelta$, den Widerstand der Zuleitungsdrähte von A und B bis zum Element E mit ϱ.

Die gesammte vom Element im ganzen Stromkreise producirte Wärme Q setzt sich nun zusammen aus folgenden Theilen. Erstens aus der Wärme W, welche im Elemente selbst, also im Inneren des Calorimeters frei werdend aus der eingesaugten Quecksilbermenge in Milligrammen durch Multiplication mit der Zahl 15,41 berechnet werden kann*). Zweitens aus der Stromwärme, welche in den Leitungen vom Element bis A und B frei wird. Dieselbe berechnet sich nach Joule's Gesetz aus der Stromstärke J, dem Widerstande ϱ und der Zeit t, welche der Versuch dauert, $= \alpha J^2 \varrho t$ ($\alpha = 0{,}239$). Endlich drittens kommt noch hinzu die Stromwärme, welche in dem Kreise ATB frei wird. Dieselbe berechnet sich aus der Potentialdifferenz $\varDelta$ an den Enden dieser Leitung und der Stromstärke J als $= \alpha J \varDelta t$. Mithin ist die ganze durch den Versuch constatirte, aus den chemischen Processen hervorgegangene Wärmeentwickelung:

$$Q = W + \alpha J^2 \varrho t + \alpha J \varDelta t \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

Die im weiteren Kreise AGB entwickelte Wärme ist verschwindend klein.

Um nun die vom Strome herrührende Joule'sche Wärme zu berechnen, müssen wir die elektromotorische Kraft E des Elementes und die Stromstärke J kennen. Die erstere ist in bekannter Weise nach absolutem Maasse, d. h. in Volt, zu bestimmen. Die Stromwärme ist dann gegeben durch Q':

$$Q' = \alpha J E t \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

$Q' - Q$ ist mithin der eventuelle Mehrbedarf q, welcher von aussen zugeführt werden müsste, um die Temperatur constant zu erhalten. Mithin haben wir die Gleichung:

$$q = Q' - Q = \alpha J E t - W - \alpha J^2 \varrho t - \alpha J \varDelta t.$$

Bei jedem Versuche war also zu messen die Stromstärke J, die elektromotorische Kraft des Elementes E, die Zeitdauer des Versuches t, die Wärmeentwickelung im Calorimeter W, der Widerstand ϱ und die Potentialdifferenz $\varDelta$. Die Versuche dauerten stets eine Stunde, mithin war $t = 3600$ Secunden; die Stromstärke wurde von 5 zu 5 Minuten gemessen und ein entsprechender Mittelwerth berechnet, der Widerstand ϱ war bei allen Versuchen $= 0{,}1$ Ohm.

Wir wollen als Zahlenbeispiel den ersten Versuch von Jahn mit einem Daniell'schen Elemente, bei welchem das Zink in Zinksulfatlösung tauchte, anführen:

*) Siehe den Artikel „Eiscalorimeter" in der Wärmelehre Bd. II, Abthl. 2.

die mittlere Stromstärke J	fand sich	$=$ 0,055607 Ampère,
die mittlere Grösse von $\varDelta J$	„ „	$=$ 0,0083819 Voltamp.,
die elektrom. Kraft E des Elementes	„ „	$=$ 1,0962 Volt,
die eingesaugte Quecksilbermenge . .	„ „	$=$ 0,6833 Gramm,
Versuchsdauer t		$=$ 3600 Secunden.

Die Rechnung ergiebt:

		Calorien
die Wärmeentwickelung im Calorimeter	$W =$	44,341
„ „ in den Zuführungsdrähten	$\alpha J^2 \varrho t =$	0,267
„ „ im Kreise ATB	$\alpha J \varDelta t =$	7,223
die Gesammtwärmeentwickelung	$Q =$	51,831
die Joule'sche Stromwärme	$\alpha J E t = Q' =$	52,533
folglich das Deficit	$q = Q' - Q =$	0,702

Dieser durch den Versuch bestimmte Werth von q ist nun mit dem aus der v. Helmholtz'schen Formel $q = \alpha \vartheta \frac{dp}{d\vartheta} J$ berechneten zu vergleichen. Hierzu muss vor Allem der Coëfficient $\frac{dp}{d\vartheta}$ bekannt sein. Man bestimmt ihn, indem man zwei gleiche Elemente einander entgegenschaltet, während das eine auf 0^0, das andere auf einer constanten Temperatur τ erhalten wird, die elektromotorische Kraft dieser Combination misst und durch τ dividirt. Für das Daniell'sche Element war erhalten worden $\frac{dp}{d\vartheta} = 0{,}000034$ Volt. Für ϑ hat man, da das Element im Calorimeter 0^0 Cels. besitzt, den Werth $\vartheta = 273$.

Die Rechnung ergiebt:

$$\alpha \vartheta \frac{dp}{d\vartheta} J = 0{,}445,$$

was mit obigem Werthe bis auf 0,257 Calorien übereinstimmt.

Es ist üblich, die Wärmeentwickelungen bei chemischen Processen nicht auf Masseneinheit, sondern auf Atomgewichte zu beziehen. Auch in diesem Falle hat Jahn die Zahlen auf jene umgerechnet, welche der Ausscheidung von 1 Atom Kupfer in Milligramm entsprechen würden. Um diese Umrechnung auszuführen, müssen wir wissen, wie viel Kupfer in dem Versuche abgeschieden wurde. Da 1 Amp. in 1 Secunde das elektrochemische Aequivalent von Kupfer, nämlich 0,3281 mg, abscheidet, so müssen 0,055607 Amp. in 3600 Secunden eine Kupfermenge gleich $0{,}055607 \times 3600 \times 0{,}3281 = 64{,}24$ mg abgeschieden haben.

Da das Atomgewicht des Kupfers aber $= 63{,}17$ ist, so hat man obige Zahlenwerthe noch mit $\frac{63{,}17}{64{,}24}$ zu multipliciren, um sie auf 1 Atom Kupfer zu reduciren. Im Mittel aus drei solchen Versuchen erhielt Jahn per Atom:

Element	Elektromotorische Kraft E	Stromwärme Q'	Chemische Wärme Q	Temperaturcoëfficient $\frac{dp}{d\vartheta}$	Deficit*) $q = Q' - Q$ beobachtet	Deficit*) berechnet
Daniell						
Cu, $CuSO_4 + 100\,H_2O$ Zn, $ZnSO_4 + 100\,H_2O$	1,0962	50,526	50,110	+ 0,000034**)	0,416	0,428
Cu, $Cu(C_2H_3O_2)_2$ aq Pb, $Pb(C_2H_3O_2)_2 + 100\,H_2O$	0,47643	21,96	16,523	+ 0,000385**)	5,437	4,844
Warren de la Rue (Pincus)						
I. {Ag, AgCl Zn, $ZnCl_2 + 100\,H_2O$	1,1306	47,506	52,17	— 0,000409	— 4,66	— 5,148
II. {Ag, AgCl Zn, $ZnCl_2 + 50\,H_2O$	1,0171	46,896	49,082	— 0,00021	— 2,186	— 2,644
III. {Ag, AgCl Zn, $ZnCl_2 + 25\,H_2O$	0,9740	44,908	47,147	— 0,000202	— 2,239	— 2,54
Ag, AgBr Zn, $ZnBr_2 + 25\,H_2O$	0,84095	38,772	39,936	— 0,000106	— 1,164	— 1,334

*) In Jahn's Abhandlung ist statt $q = Q' - Q$ die Differenz $Q - Q'$ aufgeführt, daher das Zeichen das entgegengesetzte. Wir haben diese Bezeichnung gewählt, um dieselbe mit dem q der v. Helmholtz'schen Formel übereinstimmend zu machen.

**) Diese beiden Coëfficienten sind von Gockel bestimmt.

die chemische Energie des Daniell'schen Elementes	=	50,110 Cal.
die Stromenergie „ „ „	=	50,526 „
das Deficit (beobachtet)		0,416 „
das Deficit (berechnet)		0,428 „

also in sehr befriedigender Uebereinstimmung.

Bei einigen anderen Elementen, deren elektromotorische Kraft zu gering war, um hinreichend starke Ströme und Wärmeentwickelungen zu geben, hat Jahn nach einem von Raoult stammenden Verfahren durch eine in den weiteren Kreis eingeschaltete Hülfskette die elektrolytischen Processe im Elemente verstärkt. Bezüglich der dadurch veranlassten Modificationen der Berechnung verweisen wir auf die Originalabhandlung. Wir geben hier in nebenstehender Tabelle nur noch die Schlussresultate.

Aus dem Vorgetragenen geht hervor, dass die Wärmetönung in einem Volta'schen Elemente nicht proportional der elektromotorischen Kraft desselben ist, überhaupt in keiner einfachen Beziehung dazu steht. Die früher beobachtete Proportionalität ist zum Theil nur zufällig eine angenäherte, wie z. B. beim Daniell'schen Elemente, zum Theil auf unrichtige Beobachtungen zurückzuführen.

Die obigen Versuche mit dem Chlorsilberelemente bestätigen ferner auch den von v. Helmholtz theoretisch abgeleiteten Schluss, dass bei Anwendung eines Salzes, welches sich unter Wärmeentwickelung in Wasser löst, die elektromotorische Kraft des Elementes mit steigender Concentration der Lösung fallen muss.

Die Fähigkeit eines chemischen Systems, bei einer Umlagerung der Stoffe durch Verbrauch potentieller Energie Stromenergie und auch mechanische Arbeit hervorzubringen, ist also nicht von der Menge der im Ganzen verbrauchten Energie allein abhängig. In der Wärmelehre haben wir erfahren, dass nach dem zweiten Hauptsatze von einem vorhandenen Wärmequantum ein desto grösserer Bruchtheil in Arbeit übergeführt werden könne, je höher die absolute Temperatur des Wärmequantums ist. Es kann daher auch nicht gleichgültig sein, ob ein chemischer Process Wärme von höherer oder weniger hoher Temperatur zu liefern vermag, was wiederum von der Dissociationstemperatur der entstehenden chemischen Verbindungen abhängen muss. So erklärt sich, dass galvanische Elemente von gleichem Werthe der Wärmetönung ungleichwerthig sein können in Bezug auf Stromenergie und mechanische Arbeitsleistung, da nicht die ganze, sondern nur die „freie Energie" hierfür in Verwendung kommen kann*).

*) Siehe hierüber: v. Helmholtz, Die Thermodynamik chemischer Vorgänge. Berl. Ber., Febr. 1882; sowie Braun: Ueber den elektromotorischen Nutzeffect chemischer Processe. Wiedem. Ann. XVII, S. 632 (1882).

Viertes Capitel.

Elektromagnetismus.

168 **Ablenkung der Magnetnadel durch den elektrischen Strom.** Schon lange hatte man die Vermuthung gehegt, dass zwischen Magnetismus und Elektricität eine innige Beziehung stattfinden müsse. Diese Vermuthung wurde durch die Erfahrung unterstützt, dass der magnetische Zustand der Compassnadeln durch Blitzschläge, welche sie getroffen hatten, alterirt worden war. Man versuchte ähnliche Einwirkungen durch den Entladungsschlag von Leydener Flaschen zu erhalten, alle diese Versuche führten aber nicht zu regelmässigen Resultaten. Man begnügte sich mit der Annahme, dass der elektrische Entladungsschlag in ähnlicher Weise auf die Magnetnadel wirkte wie der Schlag eines Hammers.

Im Jahre 1802 hat S. D. Romagnosi in Innsbruck Versuche über die Einwirkung einer Volta'schen Säule auf eine Magnetnadel angestellt und dann in der „Trientner Zeitung" publicirt, aus denen Aldini*) schliessen zu dürfen glaubte, dass eine Einwirkung des galvanischen Stromes auf die Nadel entdeckt worden sei. Dazu waren aber die Versuche nicht geeignet**). Wohl aber wäre möglich, dass durch dieselben Oersted, Professor in Kopenhagen, veranlasst worden ist, seine Versuche über diesen Gegenstand anzustellen, durch welche er 1820 zur Entdeckung des Elektromagnetismus geführt wurde***).

*) Aldini schrieb in seinem „*Essai theorique experimental sur le Galvanisme*" (Paris 1804): „*M. Romanesi, physicien de Trente, a reconnu, que le galvanisme faisait decliner l'aiguille aimantée.*" Aldini stand mit Oersted, der auch mehrmals in Paris war, in Correspondenz.

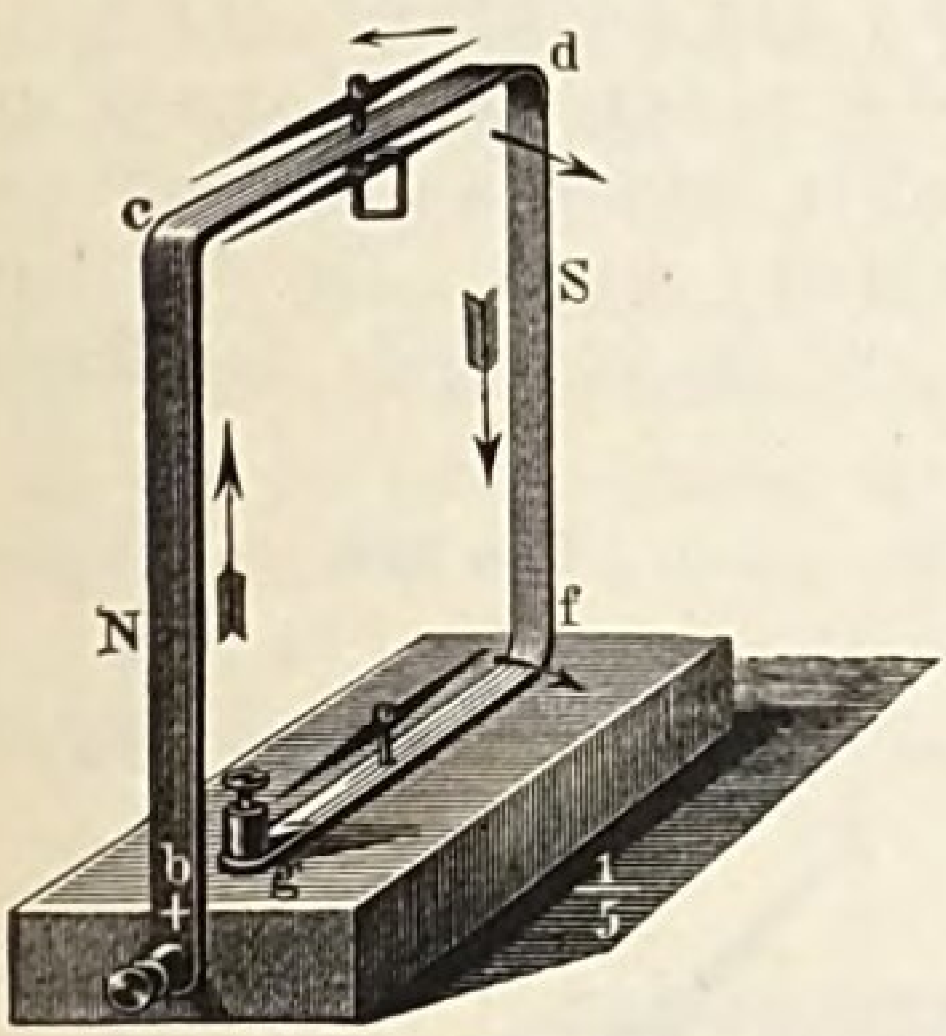
**) Siehe hierüber: Zantedeschi, Zeitschr. f. Chem. 1859, S. 242 und Fortschritte der Physik 1859, S. 479.

***) *Experimenta circa efficaciam conflictus electrici in acum magneticum;* übersetzt in Gilbert's Annalen Bd. LXVI, S. 295.

Den Oersted'schen Fundamentalversuch über die Einwirkung eines galvanischen Stromes auf die Nadel kann man auf folgende Weise anstellen: ein Streifen Kupferblech wird so gebogen, dass er ein Quadrat bildet, dessen Seiten etwa 20 bis 25 cm lang sein können; an den beiden Enden derselben, bei *b* und *g*, Fig. 471, sind die Schraubklemmen aufgesetzt, in welche die Zuleitungsdrähte für den Strom eingeschraubt werden können. In der Mitte auf dem horizontalen Stücke *cd* und auf *fg* ist eine Stahlspitze befestigt, auf welche eine Magnetnadel aufgesetzt werden kann. Ebenso befindet sich eine Stahlspitze, von einem gebogenen Kupferdrahte getragen, unter der Mitte von *cd*, auf welche ebenfalls eine Magnetnadel aufgesetzt werden kann.

Diese Vorrichtung wird nun so aufgestellt, dass die Ebene des Quadrates in die Ebene des magnetischen Meridians fällt, dass sich also die Magnetnadeln mit *cd* und *fg* parallel stellen. Sobald nun aber ein Strom durch den Apparat hindurch geht, werden die Magnetnadeln abgelenkt und zwar in der durch die ungefiederten Pfeile bezeichneten Richtung, wenn der positive Strom bei *b* ein- und bei *g* austritt und wenn *N* die Nordseite, *S* die Südseite des Apparates bildet.

Fig. 471.



Ampère hat folgende Regel gegeben, um jederzeit die Richtung der Ablenkung zu bestimmen: Man denke sich in den Strom eine kleine menschliche Figur so eingeschaltet, dass der Strom bei den Füssen ein- und am Kopfe austritt; wenn nun diese Figur ihr Gesicht der Nadel zukehrt, so wird der Südpol der Nadel (das Südende) immer nach der rechten Seite dieser Figur hin abgelenkt (der Nordpol also nach der linken Seite).

In dem Stromstück *cd* liegt die Figur wagerecht, den Kopf nach Süden, die Füsse nach Norden gekehrt. Wird die Nadel über den Strom gehalten, so muss die Figur auf dem Rücken liegen, wenn ihr Gesicht der Nadel zugekehrt sein soll; bei dieser Lage der Figur ist ihre rechte Seite die östliche. Wird die Nadel unter *cd* gehalten, so muss die Figur das Gesicht nach unten kehren, und nun wird ihre rechte Seite die westliche.

Für das Stromstück *gf* sind die Füsse der Figur nach Süden, der Kopf nach Norden gekehrt; wenn die Figur auf dem Rücken liegt, ist also die rechte Seite die westliche.

Wenn ein in der Richtung des magnetischen Meridians sich bewegender horizontaler Strom allein auf die Nadel wirkte, so würde sie sich rechtwinklig auf den magnetischen Meridian stellen; ausser dem Strome wirkt aber auch noch der Erdmagnetismus, der die Nadel in den Meridian zurückzudrehen strebt. Unter dem Einflusse dieser beiden Kräfte

wird also die Nadel eine Zwischenlage annehmen, sie wird mit dem magnetischen Meridiane einen Winkel machen, der um so grösser wird, sich also einem rechten um so mehr nähert, je grösser die Stromkraft im Vergleiche zur magnetischen Erdkraft ist.

Auch der vertical gerichtete Strom in *bc* und *df* wirkt ablenkend auf die Nadel, und zwar findet man die Richtung der Ablenkung ebenfalls nach der Ampère'schen Regel. Man denke sich nur die vertical stehende Figur dem Nordende zugewendet, so muss sich dieses Nordende nach der Linken drehen. Dabei ist aber nicht zu vergessen, dass für einen aufsteigenden Strom die Figur auf den Füssen, für einen niedergehenden auf dem Kopfe steht.

Man kann der Ampère'schen Regel auch folgende Fassung geben, welche vielleicht bequemer im Gedächtniss zu behalten ist. Man halte die rechte Hand ausgestreckt parallel dem Stromleiter in solcher Lage, dass die Fingerspitzen in der Richtung des positiven Stromes, die innere Handfläche gegen den Magnet gerichtet ist, dann zeigt der abgestreckte Daumen die Richtung an, nach welcher der Nordpol abgelenkt wird. Fig. 472 zeigt die Anwendung dieser Regel mit Bezug auf die innerhalb des Drahtgestells aufgehängten Magnetnadeln.

Fig. 472.

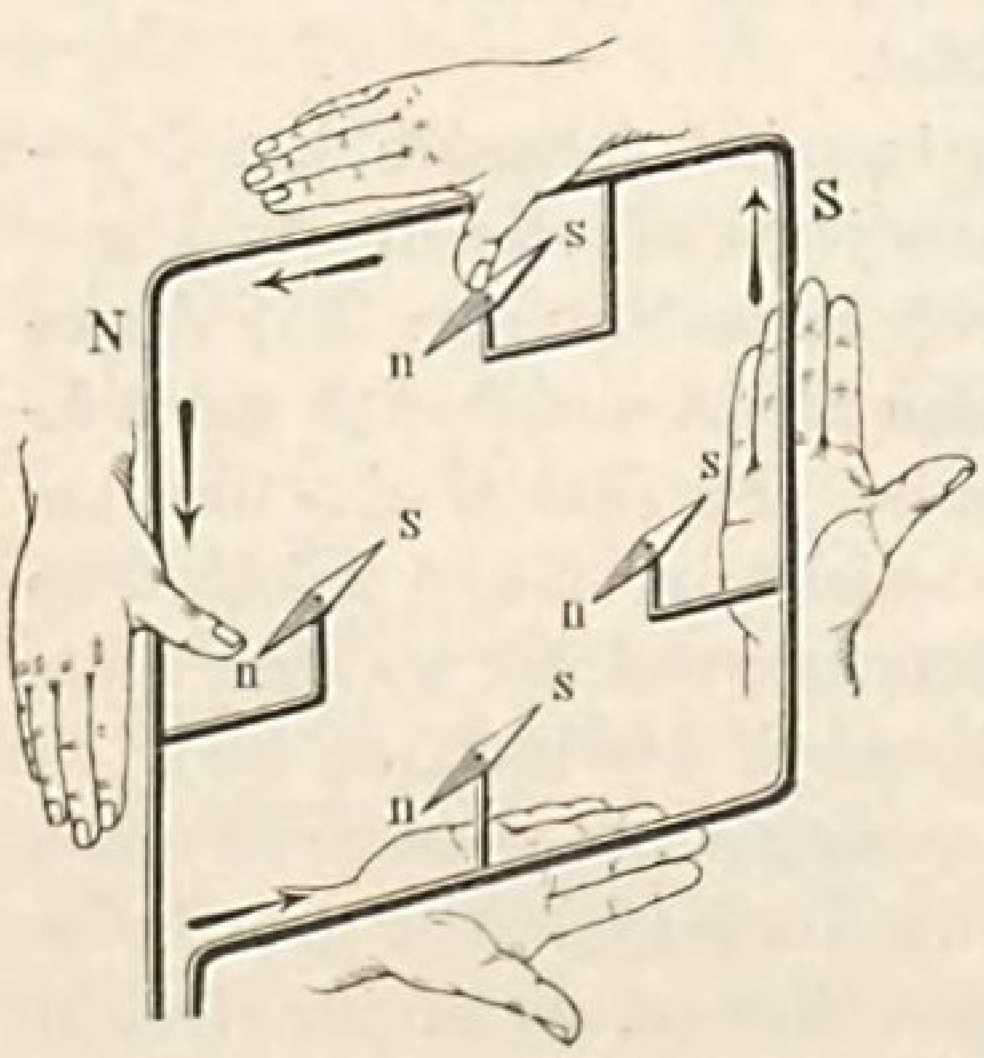
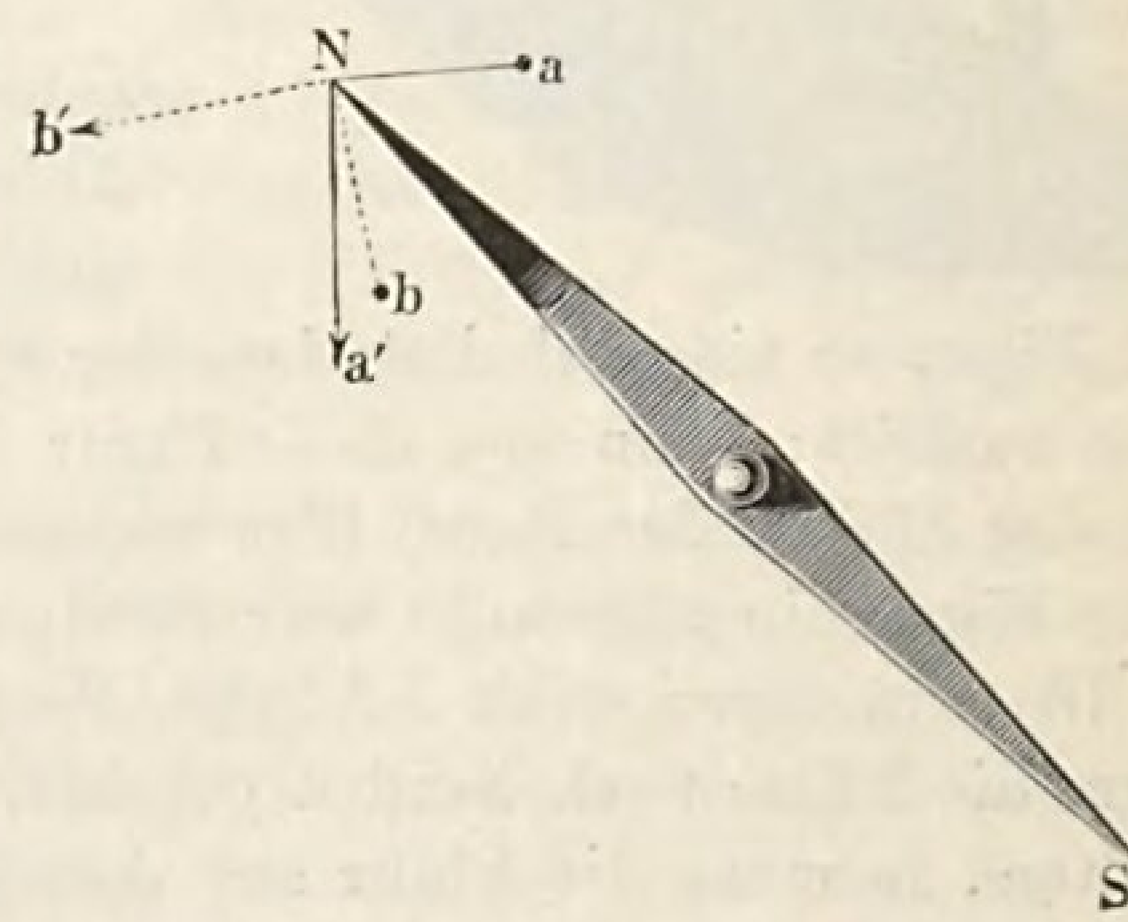


Fig. 473.



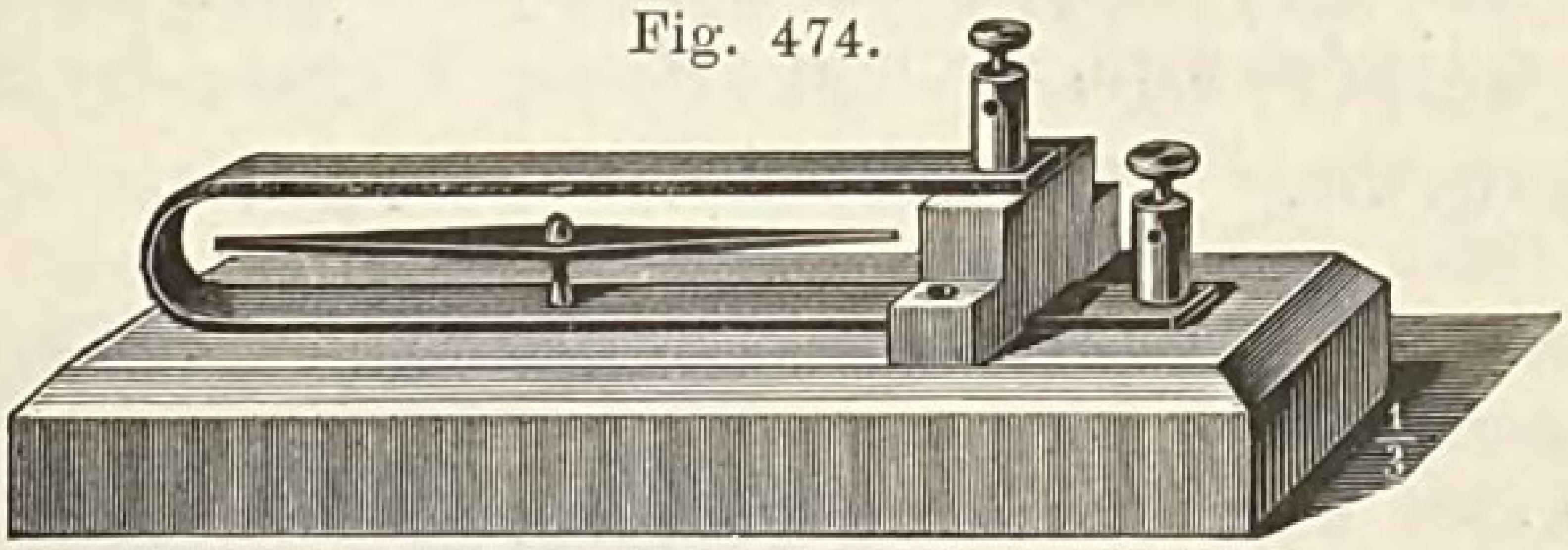
Aus dieser Ampère'schen Regel folgt, dass ein und derselbe verticale Strom das Nordende einer Nadel bald anzieht, bald abstösst, je nachdem dieser Pol sich auf der einen oder anderen Seite des Drahtes befindet. In Fig. 473 stelle *NS* eine horizontale Nadel, von oben gesehen, dar; *N* sei das Nordende der Nadel, *a* sei ein verticaler Draht, der natürlich, von oben gesehen, als Punkt verkürzt erscheint. Geht nun ein positiver Strom von unten nach oben durch den Draht, so wird die Nadel offenbar von dem Drahte gegen *a'* hin abgestossen. Befände sich aber der Draht in *b*, so würde bei aufsteigendem Strome die Nadel offenbar einen Impuls in der Richtung des Pfeiles *b'* erhalten, also dem Drahte genähert werden.

Aus Fig. 472 ersieht man sofort, dass ein und derselbe Strom die Nordpole aller Magnetnadeln, die sich innerhalb des Drahtrahmens befinden, nach derselben Seite aus der Ebene des Rahmens abzulenken strebt; denn der Daumen der Hand bleibt beim Herumgehen immer nach derselben Seite gerichtet. Für ausserhalb des Rahmens befindliche Nadeln erhalten sämmtliche Nordpole die entgegengesetzte Ablenkung. Für eine innerhalb eines Stromkreises befindliche Magnetnadel kann man daher die Ampère'sche Regel ganz einfach in der Weise ausdrücken, dass das Südende der Nadel nach der Seite hin abgelenkt wird, von welcher aus betrachtet der positive Strom die Nadel in jener Richtung umkreist, in welcher sich der Zeiger einer Uhr bewegt.

Galvanoskope, Multiplicatoren. Die eben besprochene Wirkung eines Stromes auf eine Magnetnadel bietet das bequemste Mittel, das Vorhandensein und die Richtung eines Stromes nachzuweisen. Apparate, welche hierzu dienen, heissen Galvanoskope oder Rheoskope. Sind diese Apparate durch Vermehrung der Drahtwindungen zum Nachweise sehr schwacher Ströme eingerichtet, so heissen sie Multiplicatoren, sind sie ausserdem noch zur Messung der Stromstärke geeignet, so heissen sie Galvanometer oder Rheometer. 169

Fig. 474 zeigt ein Galvanoskop der einfachsten Art, dessen Anwendungsweise nach dem Vorausgegangenen wohl selbstverständlich ist.

Fig. 474.



Wenn es sich darum handelt, einem grossen Auditorium die Ausschläge eines Galvanoskops zu demonstriren, so eignet sich hierzu recht gut das in Fig. 475 (a. f. S.) in halber Grösse abgebildete Verticalgalvanoskop von Stöhrer jun. Dasselbe ist dazu bestimmt, als Object vor die Projectionslaterne gestellt zu werden. Der verticale Theilkreis ist auf Glas photographirt. Der vertical stehende Rahmen, durch welchen der Strom um die Nadel kreist, kann mittelst Scharniers zur Seite geneigt werden, um sich der jeweiligen Nullstellung der Inclinationsnadel anzupassen. Man kann jedoch auch durch einen in die Nähe gestellten Magnestab die Magnetnadel in verticale Lage bringen. Der Theilkreis kann zu einer beiläufigen Messung der relativen Stromstärke benutzt werden.

Der Multiplicator ist ein Galvanoskop mit zahlreichen Drahtwindungen, deren jede einzelne in gleicher Weise ablenkend auf den Magnet

wirkt, so dass schon schwache Ströme eine merkliche Wirkung hervorbringen. Die Erfindung des Multiplicators geschah bald nach Oersted's Entdeckung gleichzeitig durch Schweiger und Poggendorff. Fig. 476 zeigt die schematische Anordnung der Drahtwindungen um die Magnetnadel. Damit letztere möglichst frei beweglich sei, ist sie nicht auf eine Spitze gesetzt, sondern an einem Coconfaden aufgehängt.

Fig. 475.

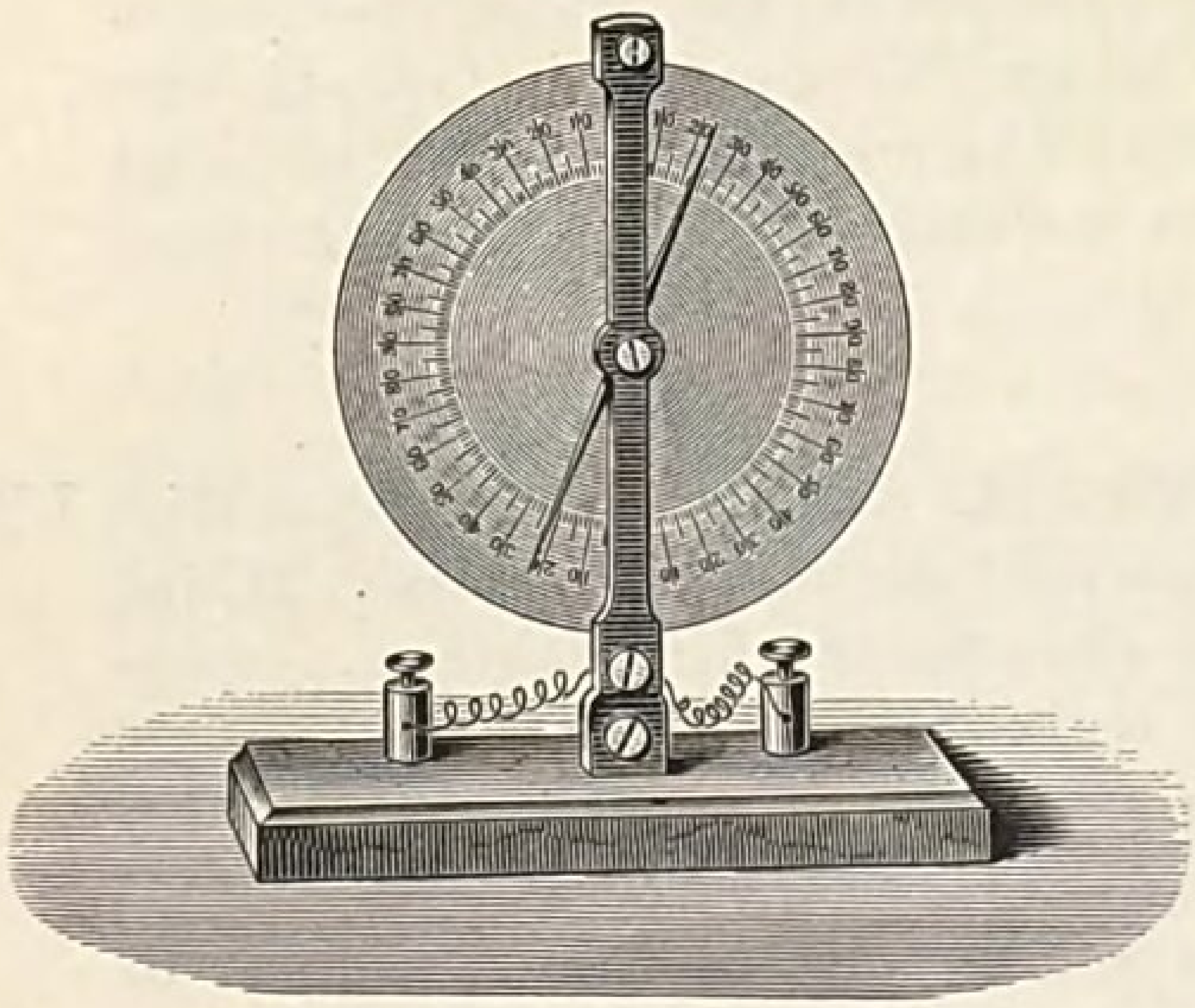
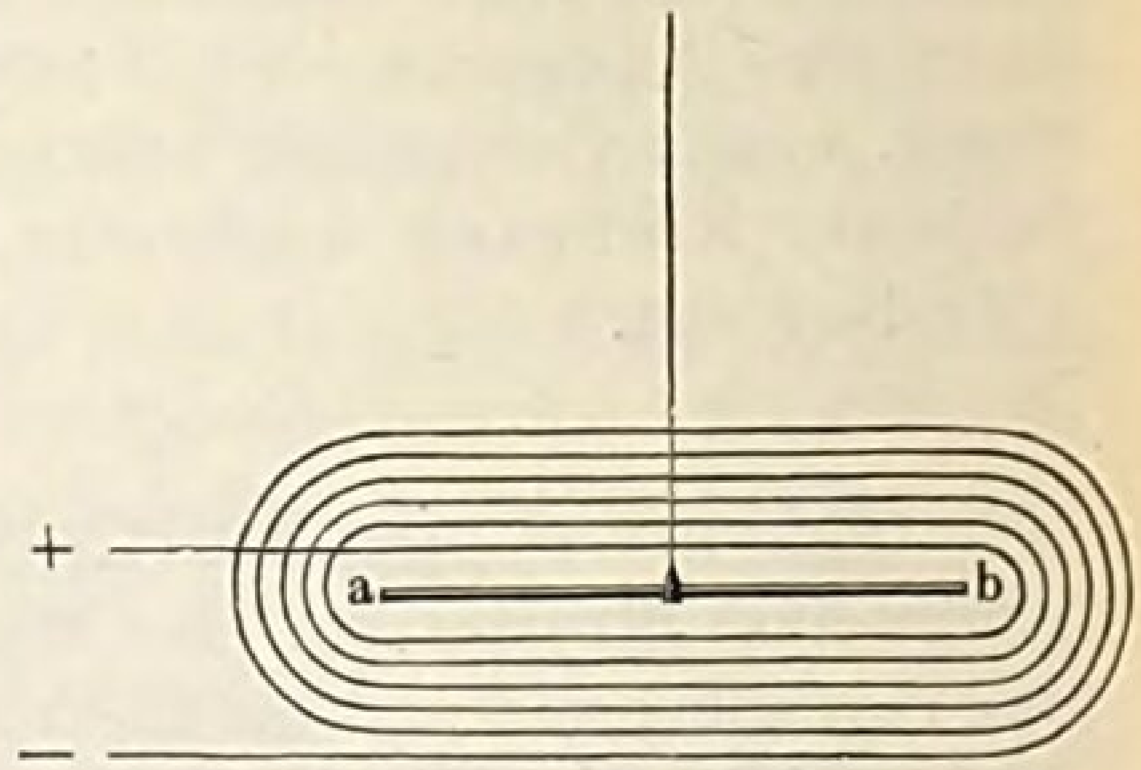


Fig. 476.



Nobili hat den Multiplicator dadurch bedeutend empfindlicher gemacht, dass er statt der einfachen Nadel ein astatisches Nadelpaar anwandte, dessen Einrichtung wir schon oben §. 17 kennen lernten. Fig. 477 erläutert die Anordnung des Nobili'schen Multiplicators. Während das Nadelpaar nur mit geringer Kraft durch den Erdmagnetismus gerichtet wird, summirt sich die Wirkung des Stromes auf

Fig. 477.

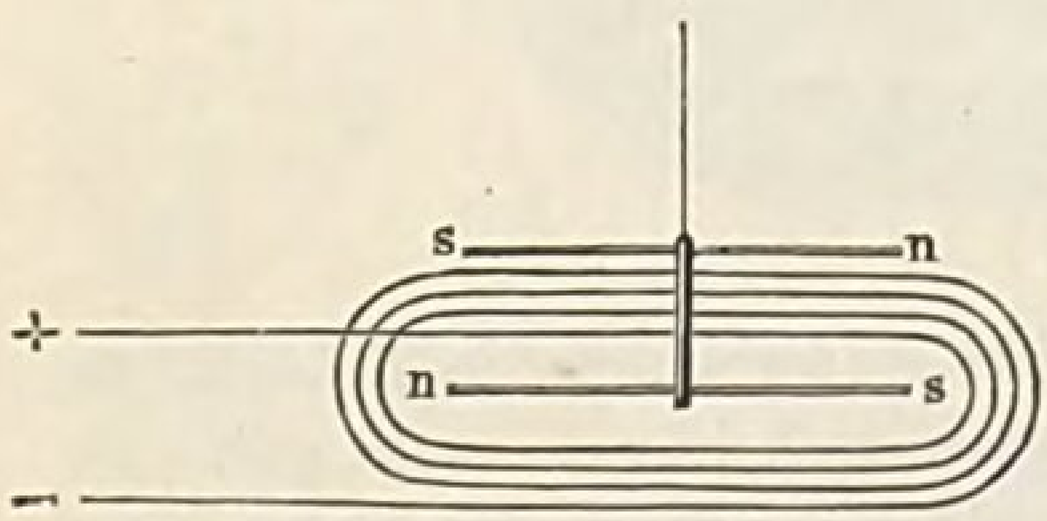
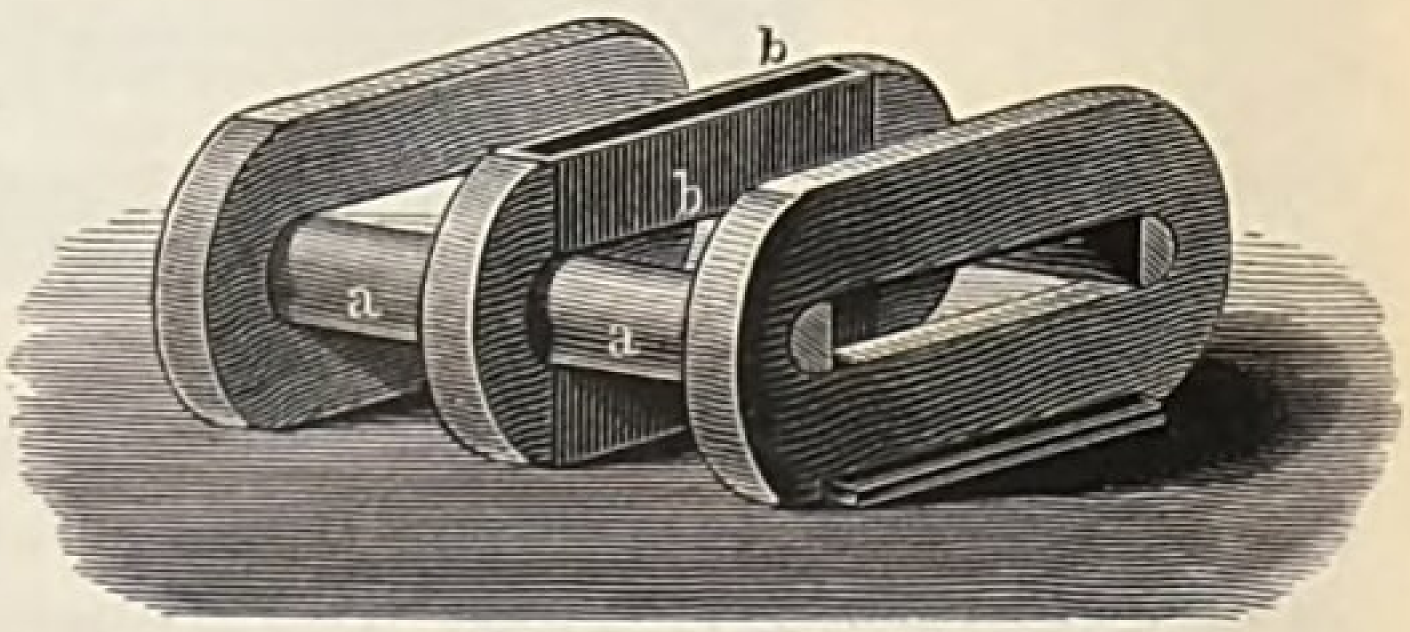


Fig. 478.



beide Nadeln, denn indem die eine Nadel innerhalb der Windungen, die andere über denselben hängt, werden beide Nadeln durch die zwischen ihnen liegenden Ströme nach gleicher Richtung abgelenkt.

Fig. 478 stellt die Einrichtung eines Holzrähmchens dar, welches zur Aufnahme der Drahtwindungen eines Nobili'schen Multiplicators dient. Zwei vertical stehende Brettchen sind durch horizontal stehende Querstäbchen *a a* verbunden. Indem der Draht über diese Stäbchen gewickelt wird, bleibt der Spielraum für die untere Nadel frei. Um den Spalt frei zu halten, durch welchen die untere Nadel hinabgelassen wird, sind die dünnen Brettchen oder Messingblättchen *b b* angebracht.

Je nach dem Zwecke, zu welchem der Multiplicator gebraucht werden soll, hat er weniger, 50 bis 100 Windungen eines Drahtes von nahe 1 mm Durchmesser, oder sehr viele, 3000 bis 25000 Windungen eines möglichst dünnen Drahtes. Im ersteren Falle brauchen natürlich die Seitenwände des Rähmchens nur ganz niedrig zu sein, und man kann dagegen den Spielraum für die untere Nadel in verticaler Richtung etwas vergrössern. Gilt es aber, einen Multiplicator von vielen Windungen zu construiren, so muss man die Wände des Rahmens hoch, und, um Raum zu ersparen, den Spielraum für die untere Nadel niedrig machen. In diesem Falle wird man wohlthun, den Spielraum für die untere Nadel von oben und unten und den verticalen Spalt von beiden Seiten mit ganz dünnen Brettchen oder noch besser mit Metallplatten zu bedecken, um das Eindringen der Drahtwindungen in diese Räume oder das Hineinragen von Seidenfasern zu verhindern. Bei Multiplicatoren von wenig Windungen ist diese Vorsichtsmaassregel unnöthig.

Bei Multiplicatoren von vielen Windungen muss natürlich die Entfernung der beiden Nadeln grösser sein, als bei solchen von wenig Windungen.

Die Gesammteinrichtung des Multiplicators ist aus Fig. 479 (a. f. S.) zu ersehen, welche ein derartiges Instrument von vielen Windungen darstellt. Das astatische Nadelpaar hängt an einem einfachen Seidenfaden, einem sogenannten Coconfaden. Um es nach Belieben heben oder senken zu können, dient eine Vorrichtung, welche in Fig. 480 (a. f. S.) in natürlicher Grösse dargestellt ist. Der Faden ist an einem Häkchen befestigt, welches das untere Ende eines vierseitigen Stäbchens bildet. Dieses Stäbchen passt in eine gleichfalls vierseitige Oeffnung des Messingsäulchens, welches in der Mitte des die ganze Vorrichtung tragenden Bügels sitzt; oben endet es mit einer Schraube, welche durch eine aussen kugelförmige Mutter hindurchgeht. Diese Kugel ist durch einen sie umfassenden Ring an ihrer Stelle festgehalten; wenn man sie also umdreht, so muss nothwendig die Schraubenspindel und mit ihr das vierseitige Stäbchen sammt dem Faden gehoben oder gesenkt werden, je nach der Richtung, nach welcher man dreht. — Zwischen der oberen Nadel und den Windungen befindet sich ein getheilter Kreis, auf welchem man die Ablenkung ablesen kann. In der Richtung der Nulllinie, den Drahtwindungen parallel, ist aus dem Theilkreis ein Spalt ausgeschnitten, der sich gerade über der von den Drahtwindungen frei gelassenen Spalte befindet.

Um zu verhindern, dass die Nadel durch zu starke Ströme ganz herumgeworfen werden kann, sind 90° rechts und links von der Nulllinie Stiftchen angebracht, gegen welche die Nadel anschlägt. Du Bois hat diese Stiftchen durch ganz dünne elastische Glimmerblättchen ersetzt.

Um den Luftzug abzuhalten, ist über das Ganze eine Glasglocke gestellt. Die Enden des Multiplicatordrahtes sind in zwei Klemmschrauben geführt, welche noch ausserhalb der Glasglocke stehen. In

diesen Klemmschrauben werden die Drähte befestigt, welche den Strom zuführen, der den Multiplicatordraht durchlaufen soll.

Dies Alles befindet sich auf einem runden Brette, welches mittelst eines Zapfens, der in der Mitte einer zweiten Scheibe von noch grösserem Durchmesser steckt, um seine verticale Axe umgedreht werden kann, wodurch es möglich wird, das Ganze so zu drehen, dass die Ebene der

Fig. 479.

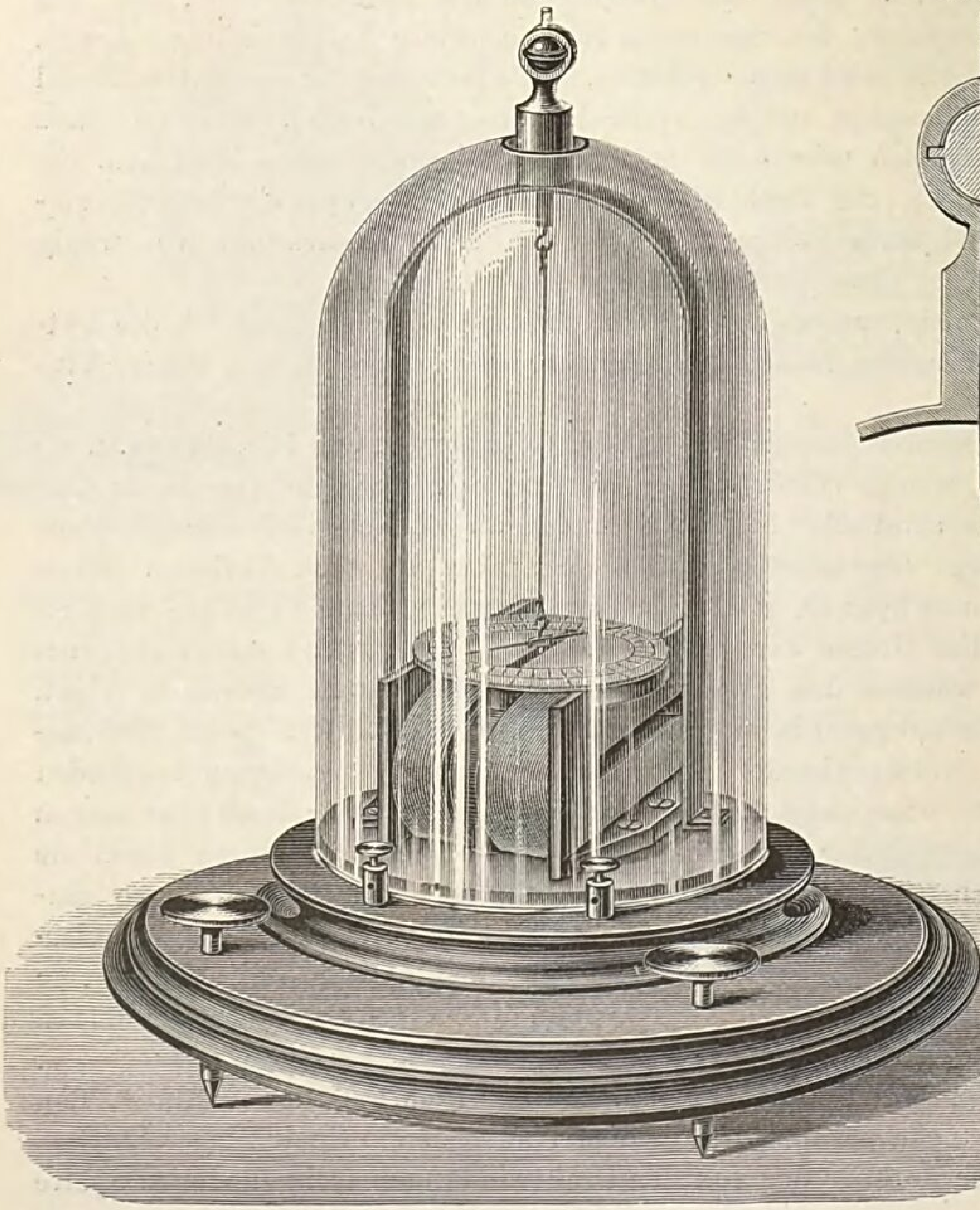
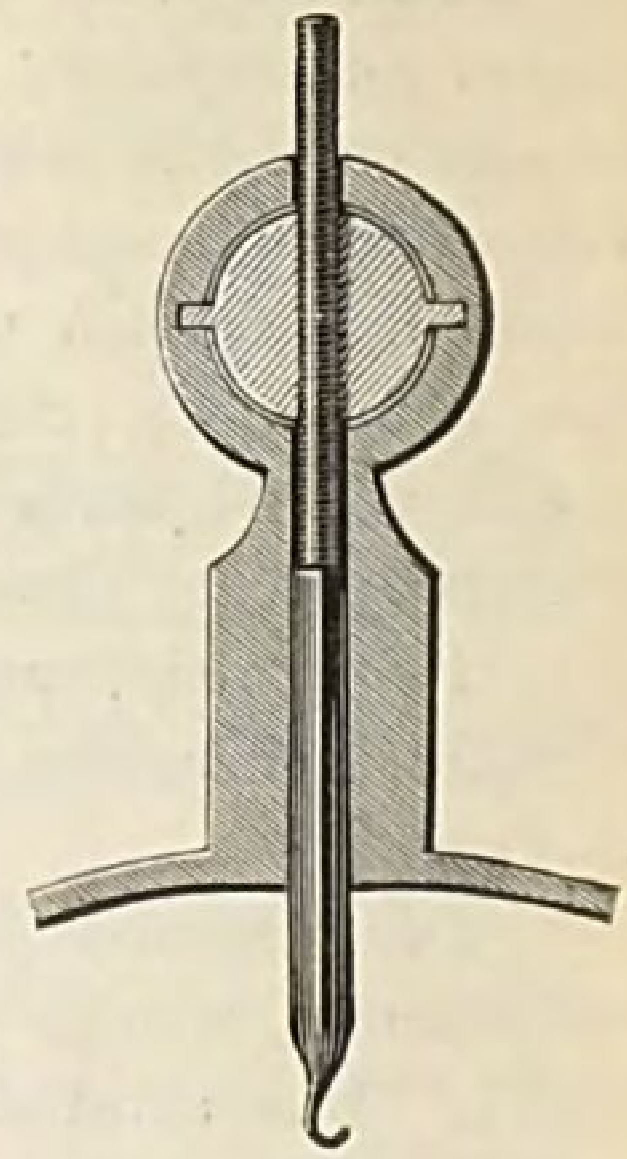


Fig. 480.



Windungen der Gleichgewichtslage des Nadelpaares parallel wird, dass also die obere Nadel auf den Nullpunkt der Theilung zeigt.

Fig. 481 stellt einen anderen, nach den Angaben von Du Bois construirten Multiplicator von 20 000 bis 30 000 Windungen dar, wie er zu Versuchen über thierische Elektricität angewendet wird. Das Verbindungsstück der beiden Nadeln des astatischen Systems ist bei diesem Multiplicator aus Schildplatt oder Elfenbein verfertigt.

Als ein Verticalmultiplicator wäre der in Fig. 482 abgebildete, von Stöhrer jun. construirte Apparat zu bezeichnen. Derselbe ist wie jener in Fig. 475 für die Projectionslampe bestimmt. Der Magnet hat die Form eines mit einer Schneide auf einer Pfanne schwingenden Wagebalkens. Der mit den Drahtwindungen überzogene Rahmen kann an der Tragsäule auf- und abgehoben und festgeklemmt werden. Die Zunge des Wagebalkens spielt als Zeiger auf der transportablen Scala.

In welchen Fällen Multiplicatoren mit vielen, in welchen Fällen solche mit wenig Windungen anzuwenden sind, kann erst weiter unten erörtert werden.

Fig. 481.

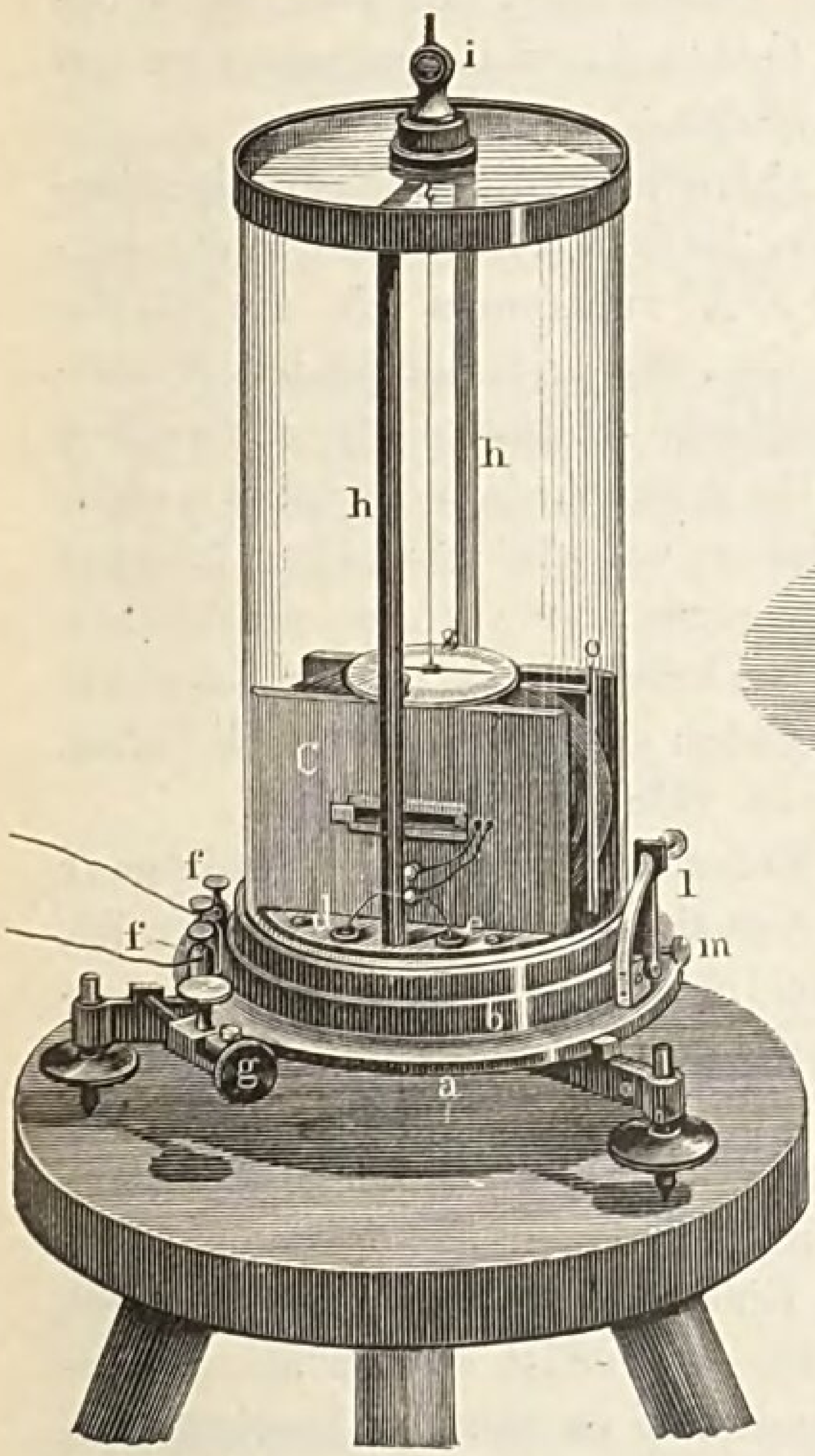
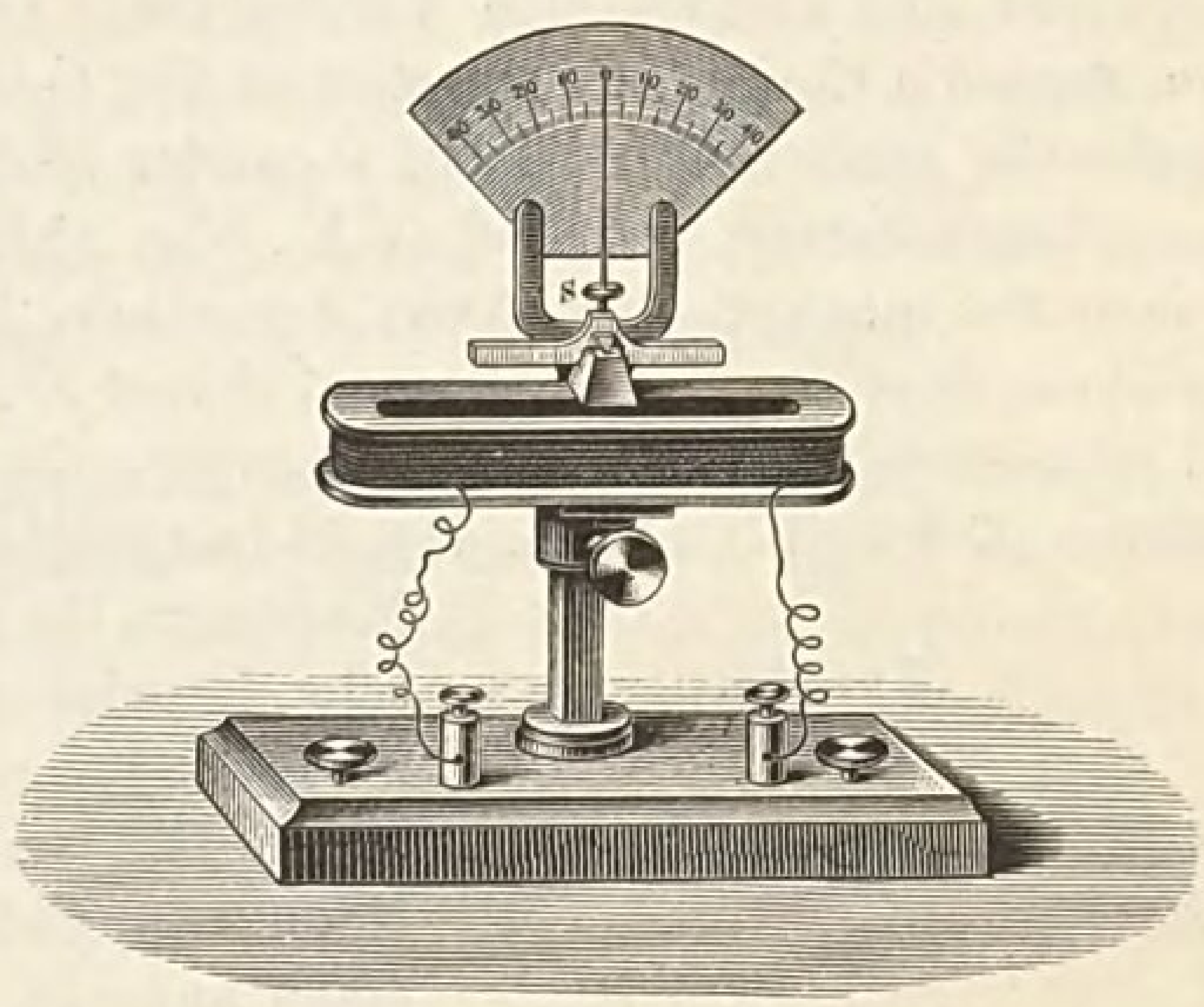


Fig. 482.



Die Ablenkung der Nadeln aus ihrer Gleichgewichtslage wächst natürlich mit der Stromstärke, doch ist die Beziehung zwischen dem Ablenkungswinkel und der Stromstärke so complicirt, dass sie sich nicht allgemein aus theoretischen Betrachtungen, sondern nur für jedes specielle Instrument auf empirischem Wege ermitteln lässt. Soll daher der Multiplicator nicht bloss als Rheoskop, sondern auch als Rheometer dienen, so zieht man vor, ihm jene Form zu geben, die wir weiter unten als Spiegelgalvanometer beschreiben werden.

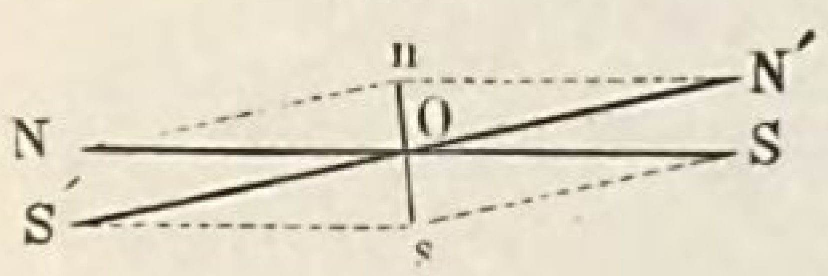
Die Empfindlichkeit des Multiplicators wächst natürlich in dem Maasse, in welchem sich das Nadelpaar mehr und mehr der vollkommenen Astasie nähert. Die zunehmende Astasie hat nun aber einige Erscheinungen im Gefolge, ohne deren Kenntniss die Behandlung empfindlicher Multiplicatoren höchst schwierig wird. Wir wollen sie hier nur kurz anführen.

Zunächst bemerkt man, dass ein astatisches Nadelpaar sich nicht mehr in den magnetischen Meridian einstellt, sondern dass es bei wachsender Astasie einen immer grösseren Winkel mit demselben macht, um endlich nahezu rechtwinklig auf dem magnetischen Meridian zu stehen.

Dieser Umstand beeinträchtigt die Brauchbarkeit des Instrumentes durchaus nicht, man hat nur den Apparat um seine verticale Axe so zu drehen, dass die obere Nadel auf dem Nullpunkt einsteht, dass also die Ebene der Windungen mit der Ebene der Nadeln parallel ist. Den Grund dieser anfangs auffallenden Erscheinung hat schon Nobili richtig darin erkannt, dass die magnetischen Axen der beiden Nadeln doch nie absolut genau in eine und dieselbe Verticalebene fallen oder, mit anderen Worten, dass die Horizontalprojectionen der beiden Axen immer einen, wenn auch sehr kleinen Winkel mit einander bilden.

Angenommen, NS und $N'S'$, Fig. 483, stellen die Horizontalprojectionen der magnetischen Axen der beiden Nadeln vor, so ist leicht einzusehen, dass die Nadelhälften ON und ON' zusammen wie die Hälfte eines kurzen und schwachen Magneten On, die anderen beiden Nadelhälften OS und OS' wie die südmagnetische Hälfte eines schwachen Magneten Os wirken, dass also das astatische Nadelpaar wie ein schwacher Magnet ns auftreten muss, der auf dem astatischen Nadelpaar senkrecht steht; oder falls die Nadeln ungleich stark magnetisch sind, einen anderen Winkel damit bildet.

Fig. 483.



Wenn die Kraft, mit welcher der Erdmagnetismus das Nadelpaar richtet, in Folge der nahe vollkommenen Astasie sehr gering geworden ist, so fängt der unbedeutende, fast unvermeidliche Eisengehalt des Kupferdrahtes, welcher zu den Windungen verwendet wurde, an, störend zu wirken, indem die Drahtmassen zu beiden Seiten des Spaltes das Nadelpaar nach beiden Seiten hinziehen und so ein stabiles Gleichgewicht auf der Nulllinie unmöglich machen. In einem solchen Falle ist es nicht möglich, die Nadel auf der Nulllinie zum Einstehen zu bringen, sie weicht stets nach der einen oder anderen Seite ab. — Hier ist es nun am zweckmässigsten, die Astasie des Nadelpaares gerade so weit zu beschränken oder, mit anderen Worten, die richtende Kraft der Erde durch andere Mittel noch so weit zu unterstützen, dass das Nadelpaar nur eben in der Nulllinie zurückgehalten wird. Du Bois hat dies bei seinem in Fig. 481 dargestellten Multiplicator auf folgende Weise erreicht. Dem Nullpunkte der Theilung gegenüber befindet sich ein verticales Messingstäbchen *o* mit einem gegen die Nadel gerichteten horizontalen Arm, an dessen Ende ein ungefähr 0,5 mm langes, gut gehärtetes und stark magnetisirtes Stahlspitzchen befestigt ist, dessen Zug gerade die Ablenkung des Nadelpaares durch den Magnetismus der Windungen aufhebt. Das Stäbchen *o* kann durch die ausserhalb der Glocke angebrachten Schrauben

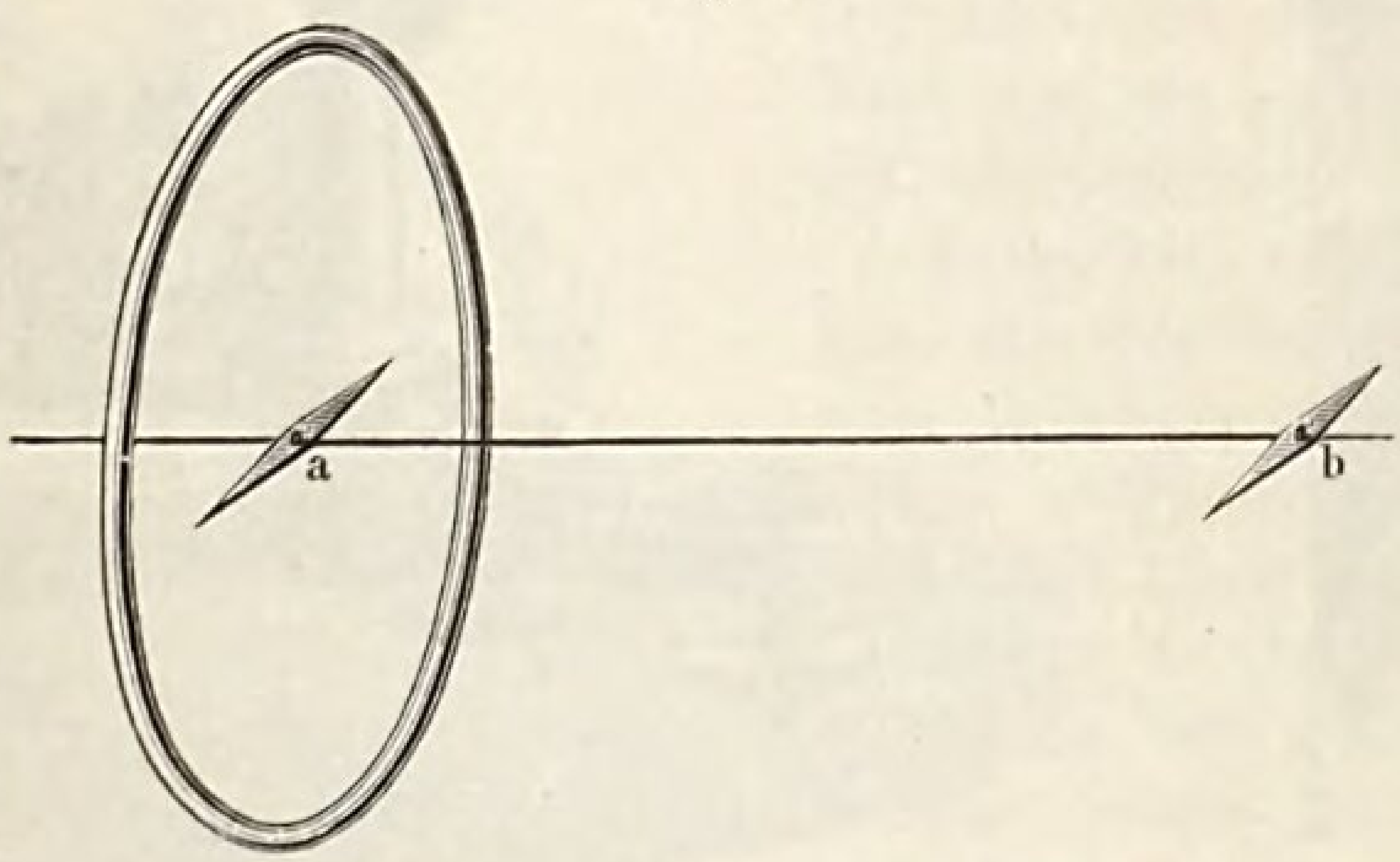
l und *m* sowohl etwas nach rechts oder links, als auch nach vorn oder zurück bewegt werden.

Einen äusserst empfindlichen Multiplicator hat Buff*) beschrieben. 12000 Windungen eines sehr feinen übersponnenen Kupferdrahtes sind auf eine cylindrische Hülse von Kupfer aufgewunden. Innerhalb derselben hängt ein kurzes dickes Magnetstäbchen, welches mit einer über den Theilkreis beweglichen Nadel zu einem astatischen System verbunden ist. Wird die obere Nadel durch eine nicht magnetische nur als Zeiger dienende Nadel ersetzt, so ist das Instrument gewissermaassen eine multiplicirende Tangentenbussole.

Selbst bei Multiplicatoren, zu deren Construction chemisch reiner Kupferdraht verwendet wurde, hat man noch magnetische Einwirkungen der Drahtwindungen auf das astatische Nadelpaar beobachtet, welche in diesem Falle nur von einem Eisengehalt der gefärbten Seide herrühren können, mit welcher der Draht übersponnen ist. Es ist deshalb anzurathen, den Draht nur mit ungefärbter Seide zu überspinnen.

Galvanometer, Tangenten- und Sinusbussole. Bereits im 170
§. 121 haben wir das gebräuchlichste Galvanometer, die Weber'sche Tangentenbussole, kennen gelernt. Bei diesem Instrumente kann man, wie erwähnt wurde, die Stromstärke nur so lange als der Tangente

Fig. 484.



des Ablenkungswinkels proportional annehmen, als die Nadel klein ist im Vergleiche zum Durchmesser des Ringes. Ist dies nicht mehr der Fall, ist der Ring verhältnissmässig eng, so wird bei zunehmender Stromstärke die Ablenkung mehr und mehr gegen diejenige zurückbleiben, welche man nach dem Gesetze der Tangenten erwarten sollte, weil ja bei wachsender Ablenkung die beiden Nadelspitzen sich merklich weiter vom Kreisstrome entfernen. Wird aber nun die Nadel aus dem Mittelpunkte *a*, Fig. 484, des Ringes herausgebracht, indem man sie auf der Axe des Kreisstromes zur Seite schiebt, so wird die Tangente des Ab-

*) Annal. d. Chem. und Pharm. Bd. LXXXVI.

lenkungswinkels, wenn der Abstand der Nadel von der Ebene des Ringes etwas bedeutend geworden ist, wenn sich z. B. die Nadel in *b* befindet, in einem rascheren Verhältniss wachsen, als die Stromstärke; denn wenn die Nadel aus dem magnetischen Meridian abgelenkt wird, so nähert sich das eine Ende derselben dem Ringe, während das andere sich von demselben entfernt, dabei aber nimmt die Einwirkung des Ringes auf das genäherte Ende in rascherem Verhältniss zu, als sie auf das entfernte abnimmt.

Da nun aber die durch den Strom bewirkte Ablenkung der Nadel stets etwas zu gross ausfällt, wenn sie sich in *b* befindet, während sie

Fig. 485.

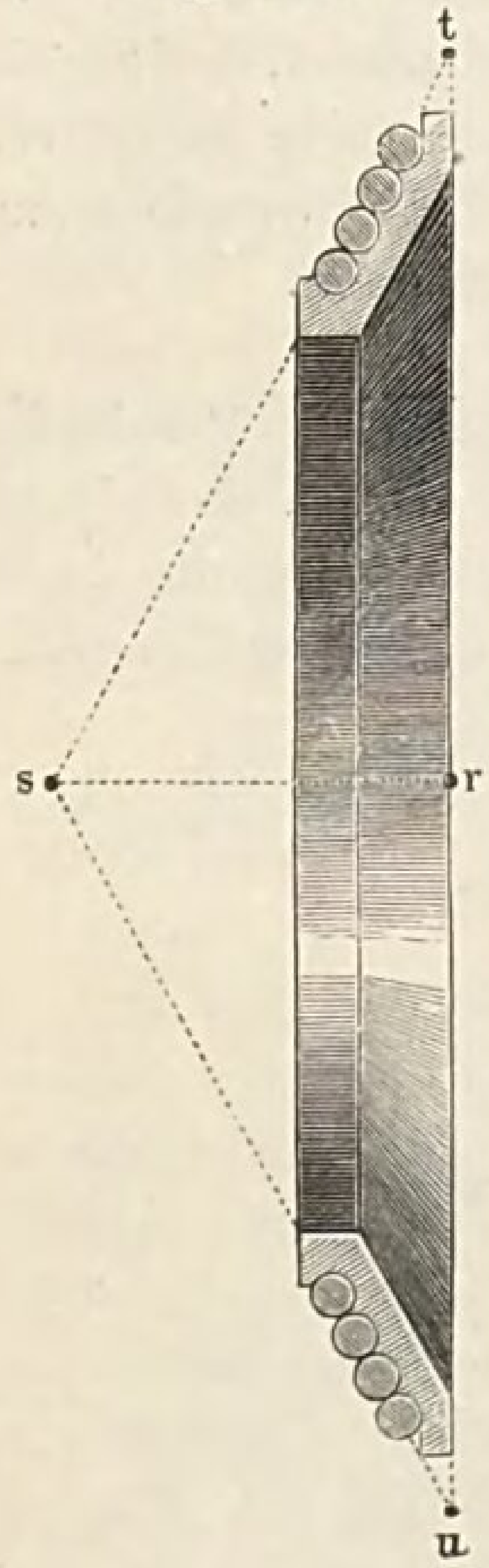
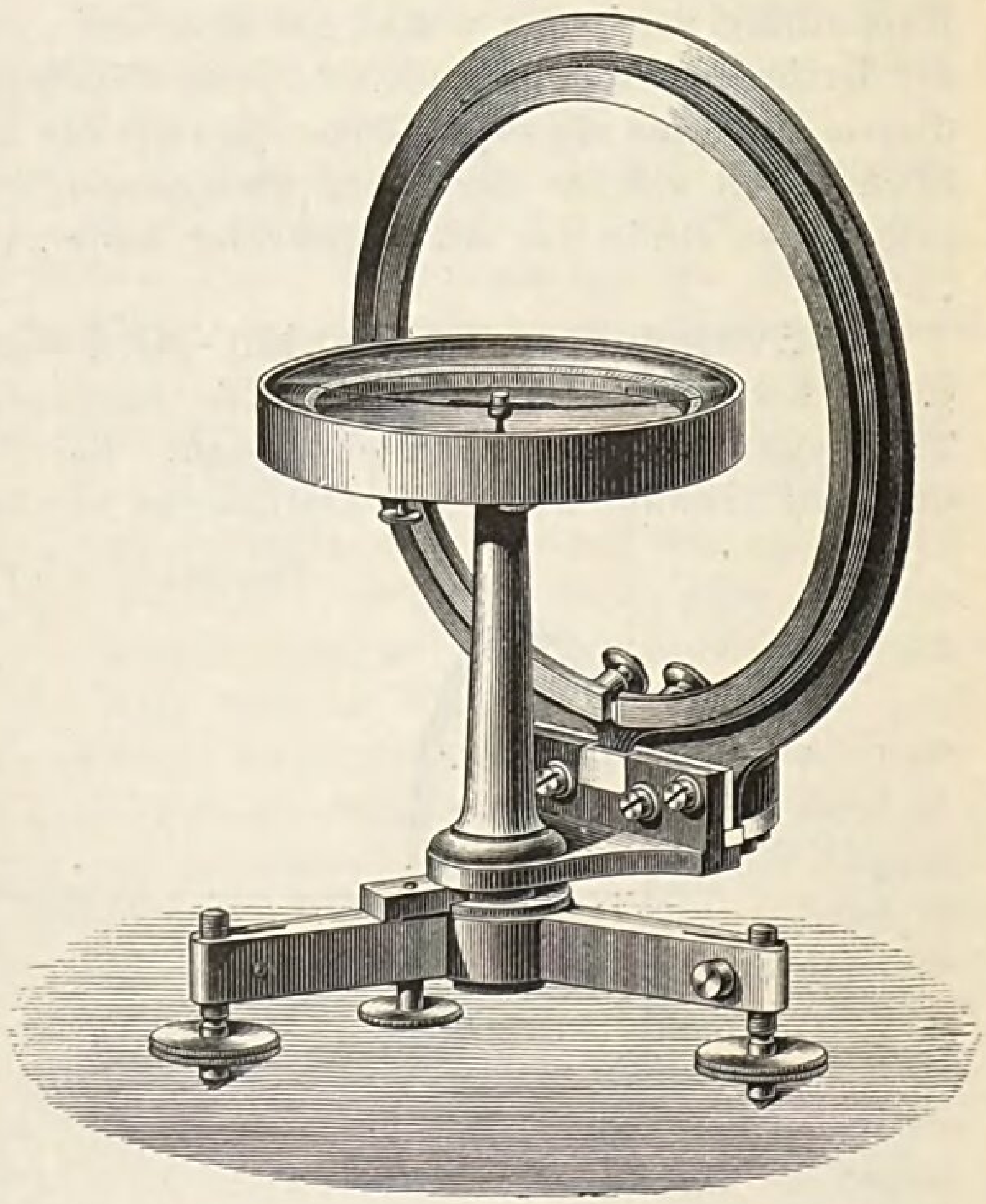


Fig. 486.



zu klein bleibt, wenn sie den Mittelpunkt *a* des Kreisstromes einnimmt, so wird es zwischen *a* und *b* eine Stellung für die Nadel geben, für welche in der That die Tangente des Ablenkungswinkels der Stromstärke stets proportional ist. H. v. Helmholtz und Gaugain haben gezeigt, dass dies der Fall ist: wenn der Abstand des Mittelpunktes der Nadel vom Mittelpunkte *a* des Kreisstromes $^1/_4$ des Ringdurchmessers beträgt.

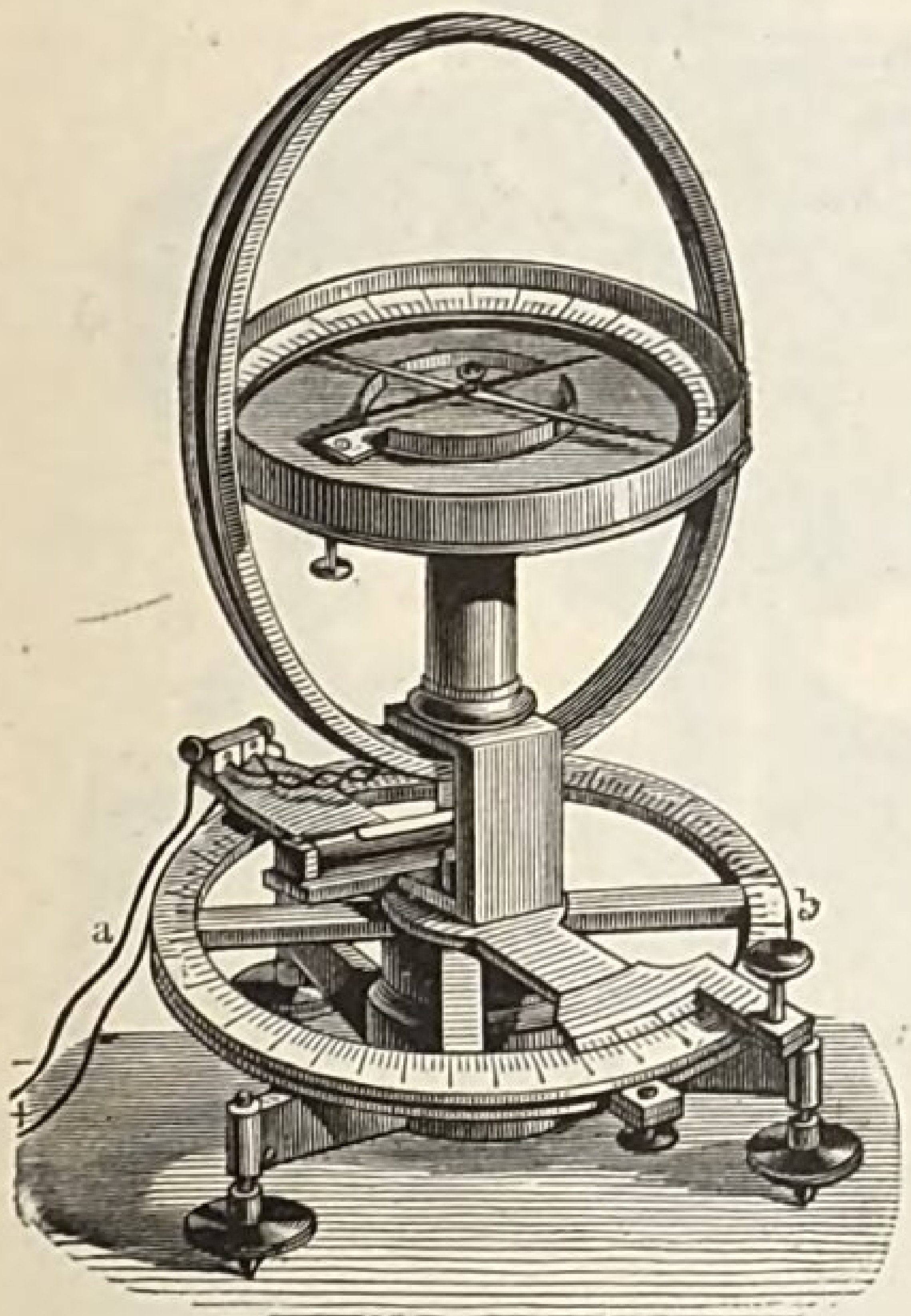
Will man eine Gaugain'sche Tangentenbussole mit mehreren Drahtwindungen construiren, so müssen dieselben sämmtlich auf der Mantelfläche eines Kegels liegen, dessen Höhe *rs*, Fig. 485, $^1/_4$ seiner Basis *tu* beträgt. Der Drehpunkt der Nadel muss dann mit der Spitze *s*

des Kegels zusammenfallen und die Ebene der Kegelbasis muss in der Ebene des magnetischen Meridians eingestellt werden.

Die einzelnen Drahtlagen sind in Rinnen eingelegt, welche in die Oberfläche eines hohlen Kegels von Holz oder von Metall eingeschnitten sind, wie dies Fig. 485 andeutet. Ist dieser Conus von Metall, so müssen die Drähte gut mit Seide übersponnen sein, damit sie mit der Masse des hohlen Kegels nicht in Berührung kommen.

Fig. 486 stellt eine von Siemens und Halske construirte Gaugain'sche Tangentenbussole dar. Der conische Ring, auf welchem die 4 Drähte aufgewunden sind, ist von Messing. Jeder der vier Drähte ist von der Masse des Messingringes, sowie von den anderen Drähten isolirt und endet mit zwei Klemmschrauben, so dass man nach Belieben den Strom nur durch einen oder durch mehrere Drahtringe kann gehen lassen, und zwar so, dass die vier Drahtringe entweder einen einzigen von 4 fachem Querschnitt repräsentiren oder, dass sie einen Draht von einfachem Durchmesser darstellen, der in vier Windungen um den Messingring gelegt ist, oder mit anderen Worten, dass man sie neben oder hinter einander combiniren kann.

Fig. 487.



Ausserdem aber ist der conische Messingring selbst, welcher zum Aufwinden der Drähte dient, unten aufgeschlitzt und jedes Ende mit einer Klemmschraube versehen, so dass dieser Ring selbst als stromleitender Kreis benutzt werden kann.

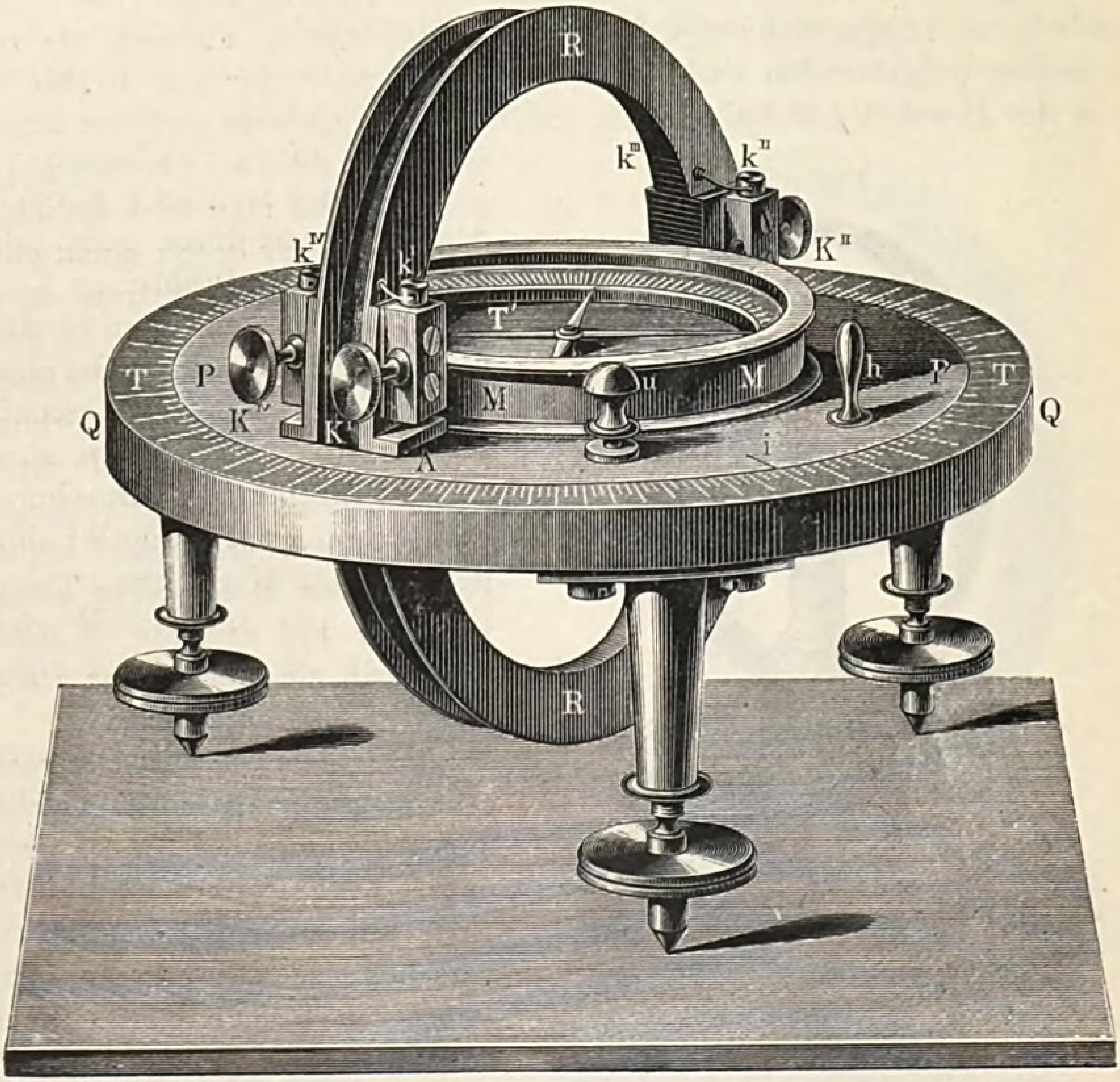
Die Sinusbussole unterscheidet sich von der Tangentenbussole dadurch, dass die Ebene der Drahtwindungen nicht in den magnetischen Meridian festgestellt, sondern der abgelenkten Magnetnadel nachgedreht wird, bis wiederum die Nadel in die Ebene der Drahtwindungen zu liegen kommt. Es wird dann der Winkel v abgelesen, um welchen die Ebene der Drahtwindungen aus der Meridianebene herausgedreht werden musste. Fig 487 zeigt eine solche Sinusbussole in einfacher Ausführung. ab ist der Theilkreis, an welchem der Winkel v abgelesen wird.

Da bei der Sinusbussole die Pole der Magnetnadel bei der Ablesung nie ausserhalb der Ebene der Drahtwindungen liegen, so entfällt für sie die bei der Tangentenbussole nöthige Bedingung, dass die Nadellänge klein sei gegenüber dem Durchmesser des Stromkreises. Deshalb kann

auch die Sinusbussole empfindlicher gemacht werden, da man die Drahtwindungen der Nadel beliebig nähern darf.

Die Kraft, mit welcher der Erdmagnetismus die um den Winkel v aus dem magnetischen Meridian entfernte Nadel in denselben zurückzuführen strebt, ist proportional mit $\sin v$ (siehe §. 38). Wenn wir nun die Kraft, mit welcher der Kreisstrom die in seiner Verticalebene liegende

Fig. 488.



Nadel aus derselben herauszudrehen strebt, mit S bezeichnen, so haben wir für den Fall des Gleichgewichts bei der Sinusbussole

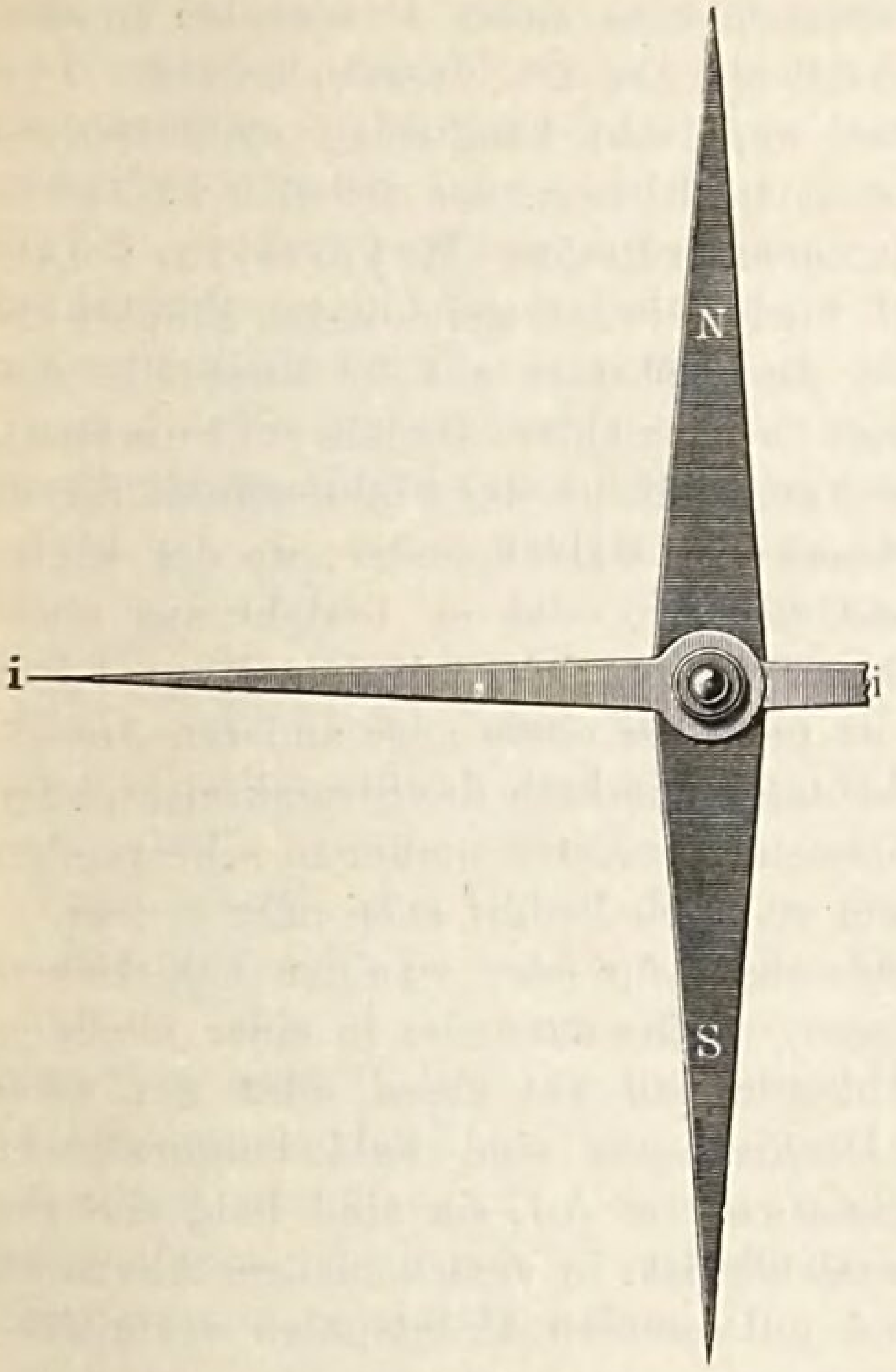
$$S = R \sin v,$$

wobei R der Reductionsfactor des Instrumentes ist. Die Stromstärke ist also, wenn während der Ablesung die Nadel stets in der Verticalebene des Kreisstromes liegt, dem Sinus des Ablenkungswinkels proportional, weshalb dieses Instrument den Namen der Sinusbussole führt.

Es ist klar, dass die Stärke des Magnetismus der Nadel keinen Einfluss auf die Grösse der Ablenkung hat, denn wenn die Nadel stärker magnetisch wäre, so würde die Einwirkung des Stromes und die des Erdmagnetismus auf die Nadel in gleichem Verhältniss zunehmen.

Siemens und Halske haben der Sinusbussole die für manche Fälle sehr zweckmässige Form Fig 488 gegeben. In dem aus Messingblech verfertigten Rahmen R sind zweierlei Drahtwindungen eingelegt; die eine Abtheilung besteht aus einem 1,34 mm dicken Drahte, welcher mit 16 Windungen in den Rahmen R eingelegt ist und dessen Enden mit den Klemmen K^{I} und K^{IV} verbunden sind. Ausser diesem ist dann noch ein dünnerer, ungefähr 0,25 mm dicker Draht mit ungefähr 1000 Windungen in den Rahmen eingelegt und seine Enden sind an den Klemmen K^{II} und K^{III} befestigt.

Fig. 489.



Der Kreisrahmen R ist in die kreisrunde Messingplatte P eingesetzt, welche in die den Theilkreis T tragende Platte Q conisch eingedreht ist und in derselben durch die Elfenbeinknöpfe h gedreht werden kann. Auf derselben Platte steht die Bussole M mit dem Theilkreise T'.

Auf der Magnetnadel, welche lang ist, wie NS, Fig. 489, wenn das Instrument als Sinusbussole dienen soll, oder kurz, wie NS, Fig. 350 auf S. 404, wenn man es als Tangentenbussole benutzen will, ist rechtwinkelig zur Nadelaxe der Index ii befestigt.

Spiegelgalvanometer im Allgemeinen. Die Tangentenbussole ist nur für verhältnissmässig starke Ströme hinreichend empfindlich, die Sinusbussole ist empfindlicher, aber unbequem im Gebrauche wegen der nöthigen Nachstellung des Stromkreises; der gewöhnliche Multiplicator ist zu Messungen wenig geeignet, weil kein einfaches Gesetz die Ablenkungswinkel mit den Stromstärken verbindet. Diese Lücke wird durch die Spiegelgalvanometer bestens ausgefüllt. Sie beruhen darauf, dass beim Multiplicator, so lange die Ablenkungswinkel sehr klein bleiben, dieselben oder deren trigonometrische Tangenten ohne erheblichen Fehler den Stromstärken porportional gesetzt werden dürfen. Um aber so kleine Winkel mit genügender Schärfe messen zu können, bedient man sich der Poggendorff'schen Spiegelablesung, deren Princip wir bereits im §. 18 auseinandergesetzt haben. **171**

Die Spiegelgalvanometer sind in sehr verschiedenen Formen ausgeführt worden, welche wir unmöglich alle beschreiben können. Die Hauptbestandtheile der hierher gehörigen Instrumente sind folgende:

1. Der Magnet mit dem Spiegel. Der erstere ist bei horizontaler Lage der magnetischen Axe mit dem vertical stehenden Spiegel fest verbunden und beide sind zusammen an einem Coconfaden so aufgehängt, dass sie sich um eine verticale Axe frei drehen können. Der Magnet hat bald die Form eines wagerecht hängenden cylindrischen Stabes (Weber), bald die einer vertical hängenden Scheibe (Wiedemann), bald die eines vertical hängenden Ringes (Meyerstein, Edelmann), bald die eines von unten nach aufwärts geschlitzten Fingerhuts (Siemens' Glockenmagnet), bald die mehrerer auf die Rückseite des Glasspiegels in horizontaler Lage aufgeklebter Nadeln (Thomson). Der Spiegel ist entweder an die Verticalfläche des Stahlmagnets direct angeschliffen, wie z. B. bei Wiedemann's Galvanometer, wo der kreisförmige Spiegel selbst als Magnet fungirt, oder er besteht aus einer möglichst dünnen versilberten Glasscheibe, welche mit dem Magnet fest oder verstellbar verbunden ist. Je nach der einen oder anderen Anordnung befindet sich der Spiegel ebenfalls innerhalb des Stromkreises, oder ausserhalb desselben in einem eigenen vor Luftströmungen schützenden Gehäuse mit Fenster. Der Spiegel ist nach Bedarf eben oder concav.

2. Der Stromkreis besteht aus mehr oder weniger zahlreichen unter sich isolirten Drahtwindungen, welche entweder in einer einzigen oder in mehreren getrennten Abtheilungen auf einen oder auf zwei Rahmen gewickelt sind. Die Drahtrahmen sind bald langgestreckt (Weber), bald kreisrund (Wiedemann u. A.), sie sind bald ein- für allemal befestigt, bald, was vorzuziehen ist, in verschiedenem Abstande von dem Magnete verstellbar und mit anderen Drahtspulen vertauschbar (Wiedemann).

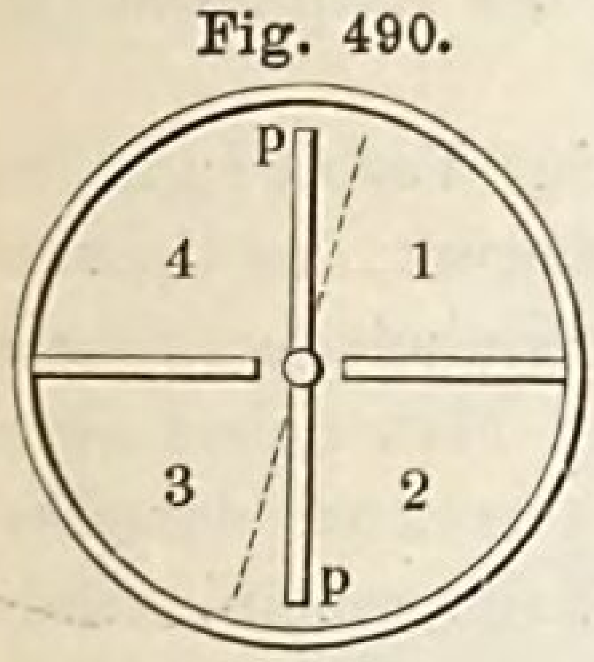
3. Die Ablesevorrichtung. Dieselbe besteht bei wissenschaftlichen Messungen meistens aus Fernrohr und Scala (§. 18), bei Demonstrationen vor einem Auditorium aus einer Projectionsvorrichtung mit einer Scala. In letzterem Falle fällt das Licht einer Lampe entweder auf den Planspiegel des Galvanometers, und wird vor oder nach der Reflexion durch eine Convexlinse soweit convergent gemacht, dass auf einem Schirme, der die Scala enthält, ein Bild der Flamme oder der Lichtspalte entsteht, oder dieses Bild wird ohne Linse durch den Concavspiegel des Galvanometers entworfen.

4. Die Dämpfung. Um die Schwingungen des Magnets vor dem Eintreten der neuen Gleichgewichtslage abzukürzen oder ganz zu unterdrücken, werden Dämpfungsvorrichtungen angebracht. Dieselben beruhen entweder auf mechanischen oder auf elektrisch-magnetischen Wirkungen.

Bei den mechanischen Dämpfungen wird der Magnet durch den Widerstand, den eine mitschwingende Platte in Luft oder in einer

tropfbaren Flüssigkeit erleidet, in seinen Bewegungen aufgehalten. Für Instrumente mit nicht zu schweren Magneten ist Luftdämpfung ganz zweckmässig. A. Töpler*) befestigt eine rechteckige Dämpferplatte aus Glimmer, Aluminiumblech oder dergl. mittelst eines Verbindungsstieles unter dem am Faden hängenden Magnet. Die Dämpferplatte schwebt vertical in einer unterhalb des Magnets aufgestellten Schachtel, indem der Verbindungsstiel durch eine centrale Bohrung des Schachteldeckels frei herabhängt. Die Schachtel ist in der aus dem Grundriss Fig. 490 ersichtlichen Weise im Inneren mit zwei festen Querwänden versehen, welche fast bis zur Mitte der Dämpferplatte reichen und mit dieser zusammen den Hohlraum in vier Quadranten scheiden. Schwingt die Dämpferplatte *pp* z. B. in die punktirte Lage, so muss die Luft aus den Quadranten 1 und 3 nach 2 und 4 durch die spaltenförmigen Zwischenräume übertreten; der hierbei stattfindende Widerstand hat eine sehr rasche Beruhigung zur Folge.

Fig. 490.



Der beschriebene Dämpfer hat die Eigenschaft, dass die Abnahme der Schwingungsbögen nach einer geometrischen Reihe erfolgt. Die Differenz der Logarithmen zweier auf einander folgender Ausschlagsbögen (das sogenannte logarithmische Decrement) ist also constant. Werden die Querwände so eingerichtet, dass man sie seitlich mehr oder weniger aus der Schachtel hervorziehen kann, so kann dadurch die Stärke der Dämpfung nach Bedarf regulirt werden. Bei Instrumenten, bei denen die Ablenkungswinkel des Magnets immer nur sehr wenige Grade betragen sollen, genügt es zur raschen Beruhigung, dass die Dämpferplatte zwischen zwei verticalen, festen Platten aufgehängt wird, welche der Dämpferplatte in der Ruhelage sehr nahe und parallel stehen.

Eine Luftdämpfung der letzteren Art findet sich z. B. bei Thomson's sogenanntem Deat-beat-Galvanometer.

Die häufiger angewendete elektrische Dämpfung beruht auf der Rückwirkung von elektrischen Strömen, die der Magnet durch seine Bewegung in umgebenden Leitern erzeugt. Diese Ströme (Inductionsströme) werden wir später kennen lernen. Hier genügt zu wissen, dass diese Dämpfung desto stärker ist, je besser leitend nach Material und Form und je näher am Magnet gelegen die umgebenden Metallmassen sind. Man giebt ihnen die Form eines dickwandigen kupfernen Gehäuses. Vortheilhaft ist es auch, diese Metallmassen in verschiedene Abstände vom Magnet bringen zu können (Regulirbare Dämpfung).

5. Die Astasirungsvorrichtung. Selten, und nur wenn es sich um die allergrösste Empfindlichkeit handelt, wendet man bei Spiegel-

*) „Ueber einige Anwendungen der Luftreibung bei Messinstrumenten.“ Wien. Akad. Ber. 19. Juni 1873 in Poggend. Ann. CXLIX, S. 416, woselbst die beiden oben erwähnten Formen der Luftdämpfung beschrieben sind.

galvanometern astatische Nadelpaare an. Dagegen gebraucht man häufig zur mehr oder weniger weitgehenden Compensation der Richtkraft des Erdmagnetismus einen oberhalb, unterhalb oder seitwärts vom Galvanometer horizontal aufgestellten Magnet (Haüy'scher Stab, §. 34). Derselbe ist meist sowohl grob als auch mikrometrisch verstellbar, nach Du Bois Reymond vom Beobachtungsfernrohr aus mittelst einer Schnurtransmission in Bewegung zu setzen. Manchmal erfolgt die grobe Einstellung mittelst eines grösseren, die feine Einstellung mittelst eines kleineren astasirenden Magnets.

Eine andere Methode der theilweisen Astasirung beruht auf der Anwendung der magnetischen Schirmwirkung des weichen Eisens (§. 36). Man umgiebt zu diesem Zwecke nach Braun das Magnetgehäuse ausserhalb der Windungen mit einem mehrere Centimeter hohen cylindrischen Ringe aus weichem Eisen, dessen Wirkung man durch Höher- oder Tieferstellen reguliren kann. Es gelingt hierdurch, die Empfindlichkeit des Instrumentes zu verzehnfachen *).

Durch eine dieser Astasirungsvorrichtungen in Verbindung mit einer Dämpfung kann man es erreichen, dass der Magnet des Galvanometers ohne weitere Schwingungen direct in die neue Ruhelage übergeht, wodurch die Messungen sehr viel bequemer werden. Man heisst diesen Zustand einer Magnetnadel den aperiodischen Zustand derselben. E. du Bois Reymond hat diesen Zustand zuerst eingehend studirt und dessen Bedeutung hervorgehoben **).

Werden die Schwingungen der Magnetnadel nur durch eine starke Dämpfung beeinflusst, so hat der Apparat nur geringe Empfindlichkeit; er wird dagegen sehr empfindlich, wenn man nur eine schwache Dämpfung und daneben eine Astasirung anbringt. Je schwächer in diesem Falle die Dämpfung, desto näher ist der astasirende Magnet zu bringen, um den aperiodischen Zustand herbeizuführen, und desto empfindlicher wird das Instrument.

172 **Specielle Formen des Spiegelgalvanometers.** Wir wollen nun einige specielle Formen von Spiegelgalvanometern näher kennen lernen.

Einer der einfachsten hierher gehörigen Apparate ist Weber's Spiegelgalvanometer, Fig. 491, welches wir schon zum Theil in §. 18 kennen gelernt haben. Das transportable Magnetometer ist eben dadurch zu einem Multiplicator gemacht worden, dass der Magnetstab mit einer Reihe von Windungen übersponnenen Kupferdrahtes umgeben ist. Die Drahtwindungen bestehen aus drei gesonder-

*) Siehe auch Wassmuth: Ueber die Anwendung der magnetischen Schirmwirkung zur Astasirung von Galvanometern: Zeitschrift für Elektrotechnik in Wien II, 514.

**) Die aperiodische Bewegung gedämpfter Magnete; Berliner Akad. Ber. 1860. 1870.

ten Drahtstücken, von denen jedes drei Lagen bildet. Jedes Ende eines jeden Drahtstückes ist mit einer Klemmschraube versehen, wie man

Fig. 491.

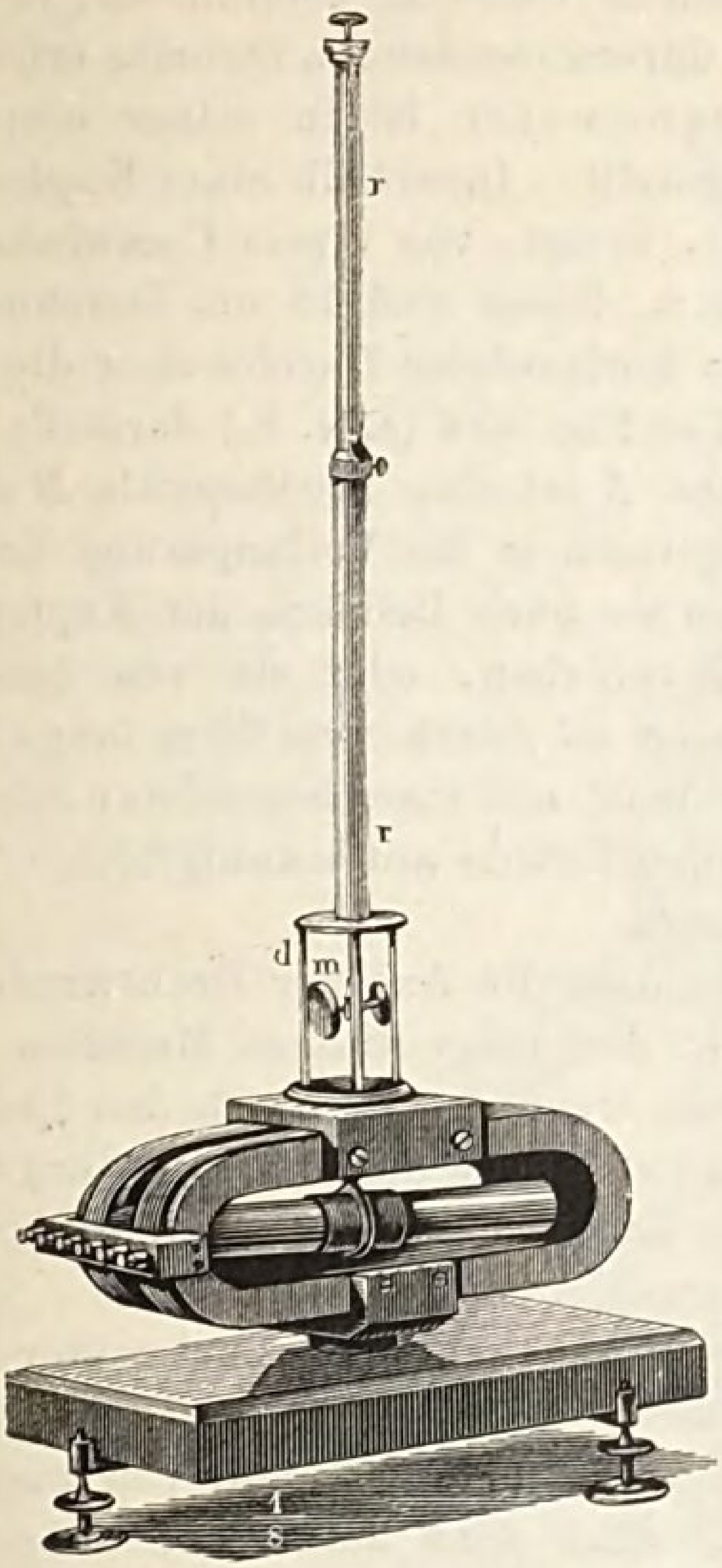


Fig. 492.

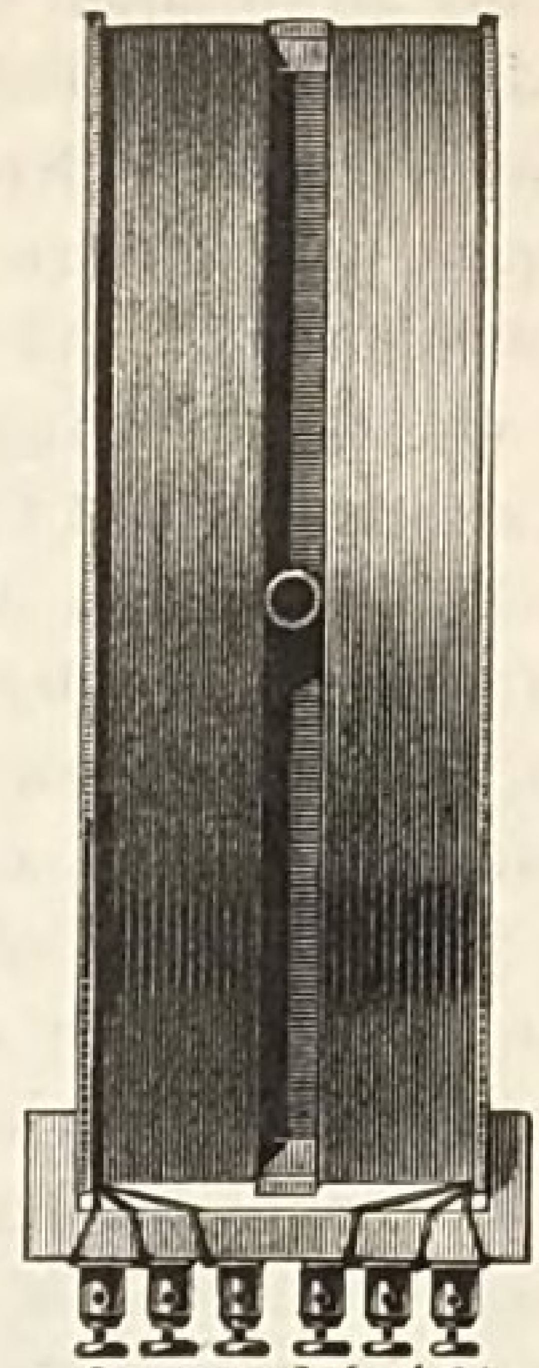


Fig. 494.

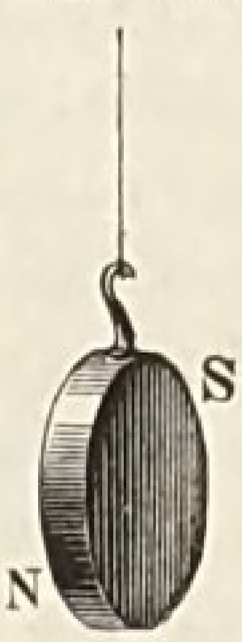


Fig. 493.

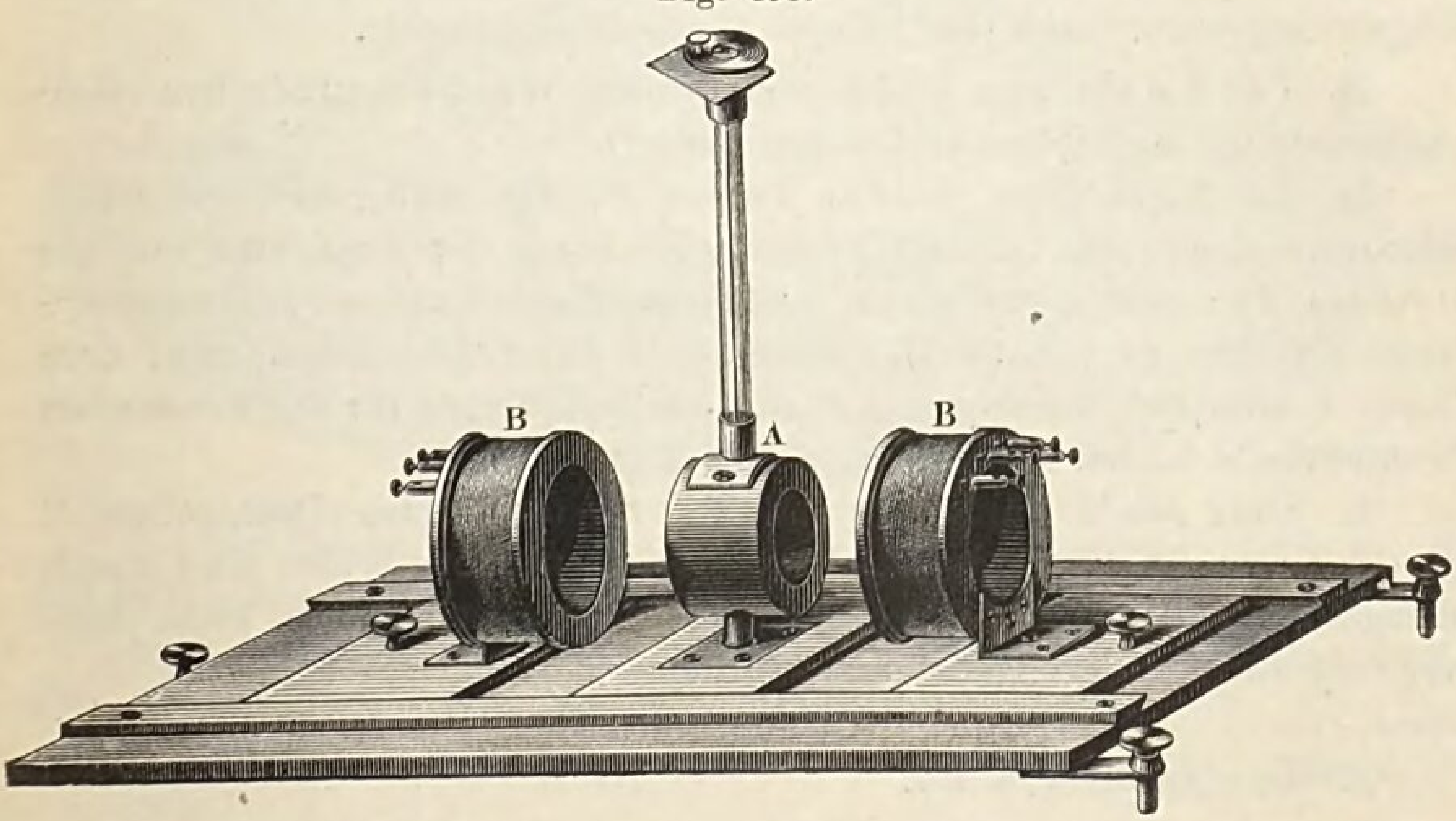


Fig. 492 (a. v. S.) deutlicher sieht, und zwar bilden f und f' die Enden der untersten, g und g' die Enden der mittleren, h und h' endlich die Enden der obersten Drahtlage. Mittelst dieser Klemmschrauben ist man nun im Stande, die Drahtlagen auf verschiedene Weise zu combiniren, je nachdem es die Eigenthümlichkeiten des durchzusendenden Stromes erfordern.

Wiedemann's Spiegelgalvanometer ist in seiner ursprünglichen Form, Fig. 493 (a. v. S.), dargestellt. Innerhalb einer Kupferhülse *A*, deren Wanddicke 17 mm beträgt, hängt, von einem Coconfaden getragen, ein Stahlspiegel von 1 mm Dicke und 19 mm Durchmesser, welcher so magnetisirt ist, dass sein horizontaler Durchmesser die magnetische Axe desselben bildet, wie dies Fig. 494 (a. v. S.) darstellt.

Auf jeder Seite der Kupferhülse *A* ist eine Drahtspirale *B* so angebracht, dass die Axen der Drahtspiralen in die Verlängerung der Axe der Kupferhülse fallen, und dass man sie nach Belieben der Kupferhülse nähern, ja theilweise über dieselbe schieben, oder sie von derselben entfernen kann. Jede dieser Spiralen ist durch zwei 60 m lange 1 mm dicke Drähte gebildet; jedes Drahtende ist mit einer besonderen Schraubklemme versehen, so dass die einzelnen Drähte auf mannigfaltige Weise mit einander verbunden werden können.

Der Apparat wird so aufgestellt, dass die Axe der Drahtwindungen und der Kupferhülse rechtwinklig auf dem magnetischen Meridian steht, dass also die Ebene des Stahlspiegels, wenn er nur durch den Erdmagnetismus gerichtet wird, parallel mit der Ebene der Drahtwindungen ist

Um Luftströmungen abzuhalten, ist die Kupferhülse auf beiden Seiten durch geschliffene Glasplatten verschlossen.

Die Ablenkungen des Spiegels werden wie beim Magnetometer durch ein Fernrohr abgelesen, welches sammt der Scala in der Verlängerung der Axe, der Hülsen und der Spiralen in einem Abstande von ungefähr 2 m aufgestellt ist. Der astasirende Stab wird ausserhalb aufgestellt.

Später hat Wiedemann ebenfalls den Magnetspiegel durch einen Magnetring ersetzt und den Spiegel oberhalb angebracht.

M. Th. Edelmann giebt von seinem Wiedemann'schen Galvanometer die nachfolgende Beschreibung*).

In der Mitte eines runden Fusses *P*, Fig. 495, mit drei Stellschrauben steckt ein Conus *C*, der die Drehung des Apparates um die verticale Axe zum Zwecke der leichteren Einstellung in den magnetischen Meridian gestattet. Die Schraube *a* fixirt diese Lage. Auf dem Conus *C* sitzt der Messingring *A*, der das Hauptlager für die messenden Bestandtheile bildet. In ihm sind befestigt:

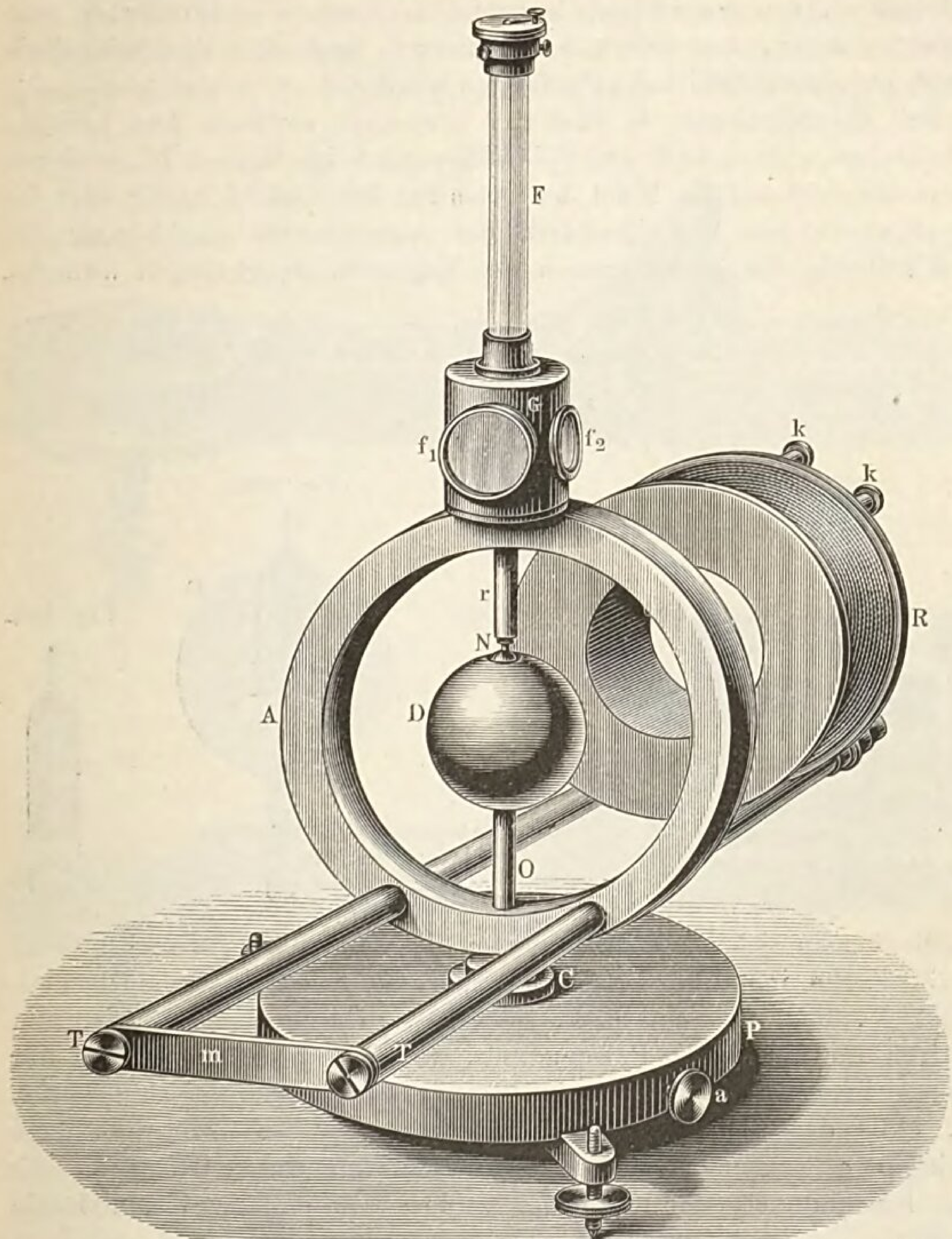
1. Zwei runde Führungsstäbe *T T* für die beiden Drahtrollen *R* (in der Figur ist die vordere Rolle weggelassen); ihre Enden sind durch übergesteckte Klammern *m* zusammengehalten, welche nur beim Auswechseln der Rollen abgenommen werden.

*) Neuere Apparate, S. 157.

2. Der axiale Stift *o*, Fig. 495, 496, 498, auf welchem der Dämpfer *D* steckt.

3. Die Röhre *r*, Fig. 495, 496, dem oberen Lager für den Dämpfer.

Fig. 495.



4. Die Spiegelkapsel *G* und die Fadensuspensionsvorrichtung *F* mit ihrem Torsionskopfe.

In den ringförmigen oder glockenförmigen Magnet *N*, Fig. 495, 496, 497, 498, ist ein Schildplattstäbchen *s* eingeschraubt, das frei durch die Röhre *r* hindurchgeht und den Magnet mit dem Spiegel *S*

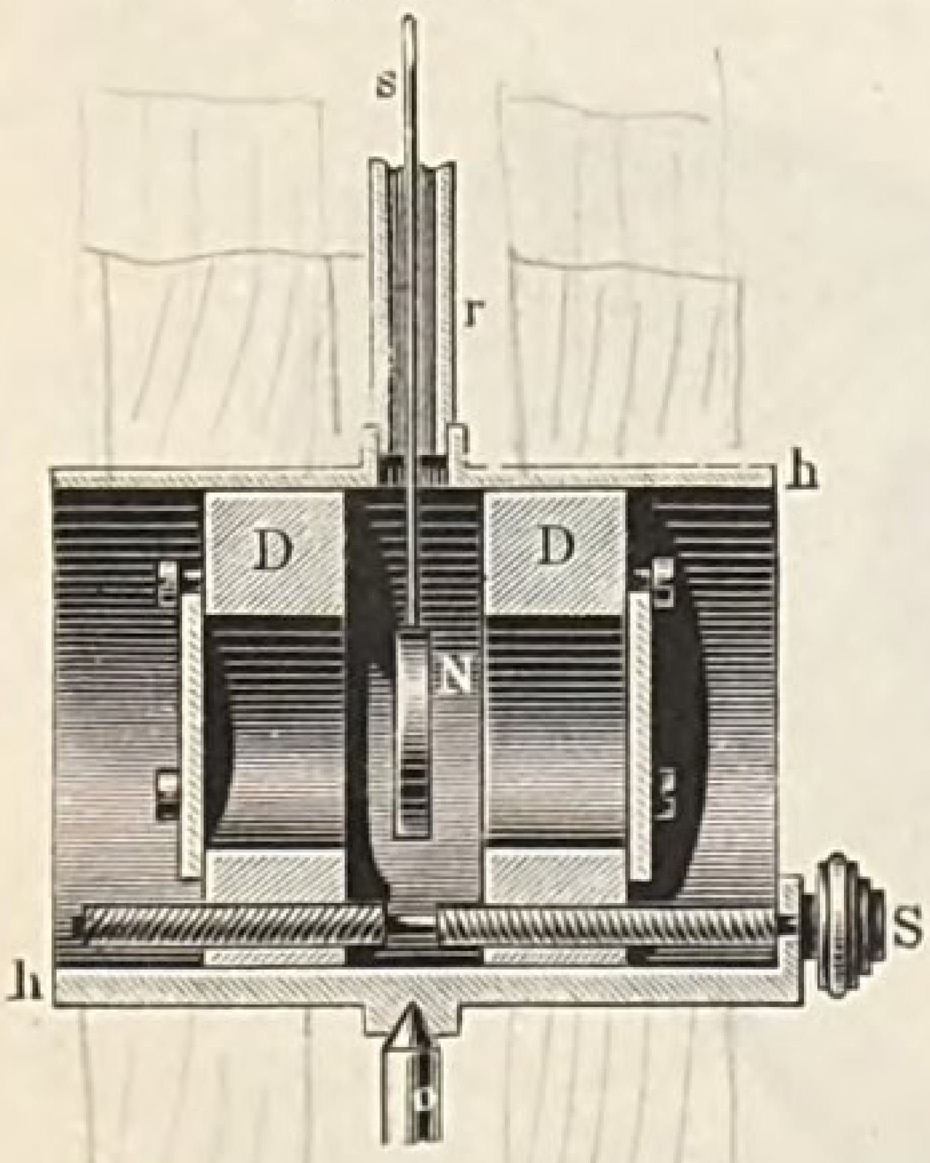
(Fig. 497) verbindet, welcher sich innerhalb des Spiegelgehäuses *G* befindet. Der Spiegel *S* ist mittelst dreier Träger an einem leichten Rahmen befestigt.

Die Bewegungen des Spiegels werden durch das Fenster f_1 hindurch mit Spiegel und Scala abgelesen, oder auch objectiv projicirt, wobei Lichtstrahlen, von einem Spalt ausgehend, durch das Fenster f_1 zum Spiegel gelangen, und durch das Fenster f_2 und eine Projectionslinie gehend, auf einem Schirme aufgefangen werden.

Das Spiegelgehäuse *G* lässt sich um seine verticale Axe beliebig herumdrehen, ebenso auch die Spiegelfassung *s* im Magnet *N*, wodurch man in Hinsicht auf die Wahl des Ortes für das Scalenfernrohr oder die Projectionsaxe von der Mechanik des Instrumentes unabhängig ist. Wenn man für die Schwingungen des Magneten Aperiodicität wünscht,

Fig. 497.

Fig. 496.



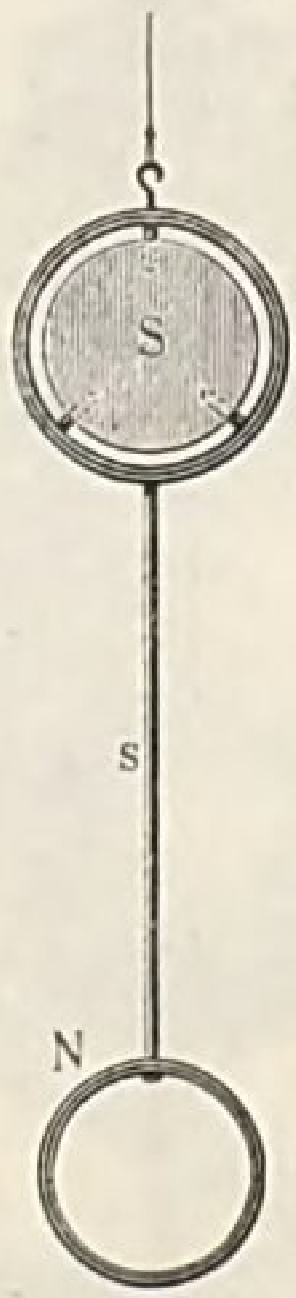


Fig. 498.

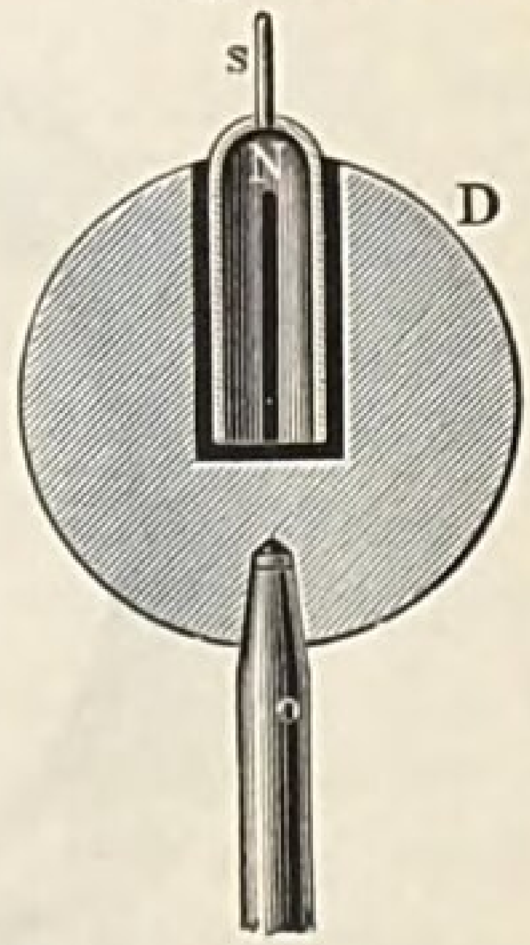
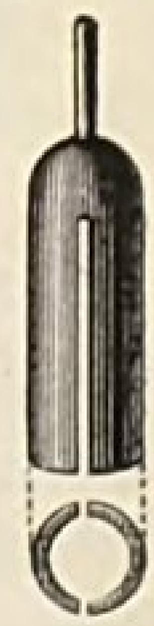


Fig. 499.



so bedient man sich als Dämpfer einer dickwandigen runden Kugel *D* Fig. 495 u. 498, innerhalb welcher als Nadel der Siemens'sche Glockenmagnet *N*, Fig. 498 und 499, schwingt. Durch diese Einrichtung resultiren für die Nadel Bewegungen, vermöge welcher sie aus der Ruhelage in eine neue Stellung oder umgekehrt asymptotisch förmlich fällt, ohne dass das Spiegelbild der Scala nur im Geringsten jene Schwingungen erkennen lässt, deren Beseitigung durch Beruhigen mit einem Hülfsmagnet oder durch passende Stromschlüsse Vielen lästig erscheint.

Es ist jedoch eine solche starke Dämpfung nicht immer erwünscht, z. B. wenn durch Anbringung eines astasirenden Magnets die Directionskraft der Erde vermindert und hierdurch die Empfindlichkeit des Galvanometers bedeutend erhöht werden soll. Es resultirt dann bei Verwendung des Siemens'schen Dämpfers Ueberaperiodicität. Die Magnetnadel hat keine bestimmte Ruhelage mehr und es empfiehlt sich dann die Ver-

wendung des Edelmann'schen verstellbaren Dämpfers, Fig. 496. Derselbe besteht aus zwei starken Kupferscheiben *DD* Wiedemann'scher Form, welche innerhalb einer weiten Messingröhre *hh* geführt und deren Entfernung von dem ringförmigen Magneten *N* durch die rechts- und linksgängige Schraubenspindel *S* regulirt werden kann.

Mit Hülfe dieses verstellbaren Dämpfers lässt sich jeder beliebige Grad von Dämpfung erreichen, sowie reine Aperiodicität für beliebige Directionskräfte der Nadel. Der nöthige Grad der Empfindlichkeit

Fig. 500.

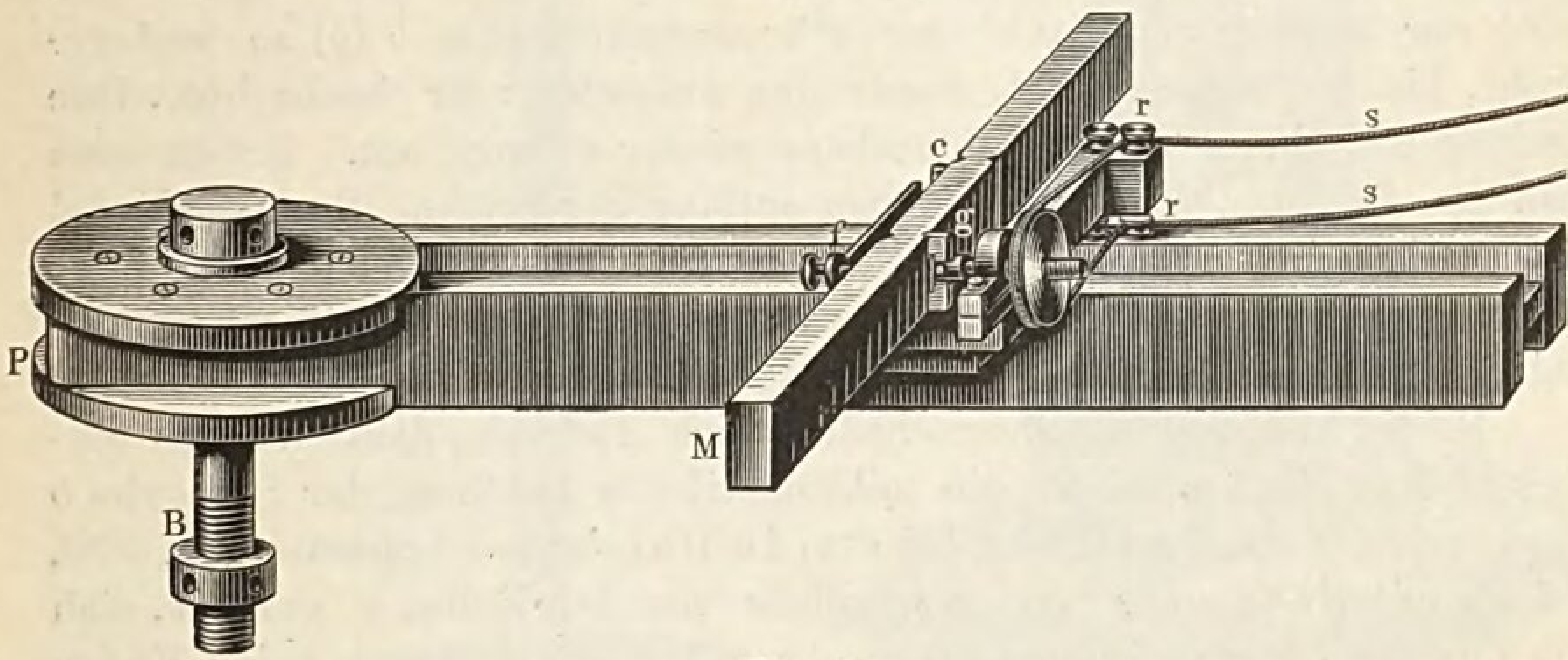
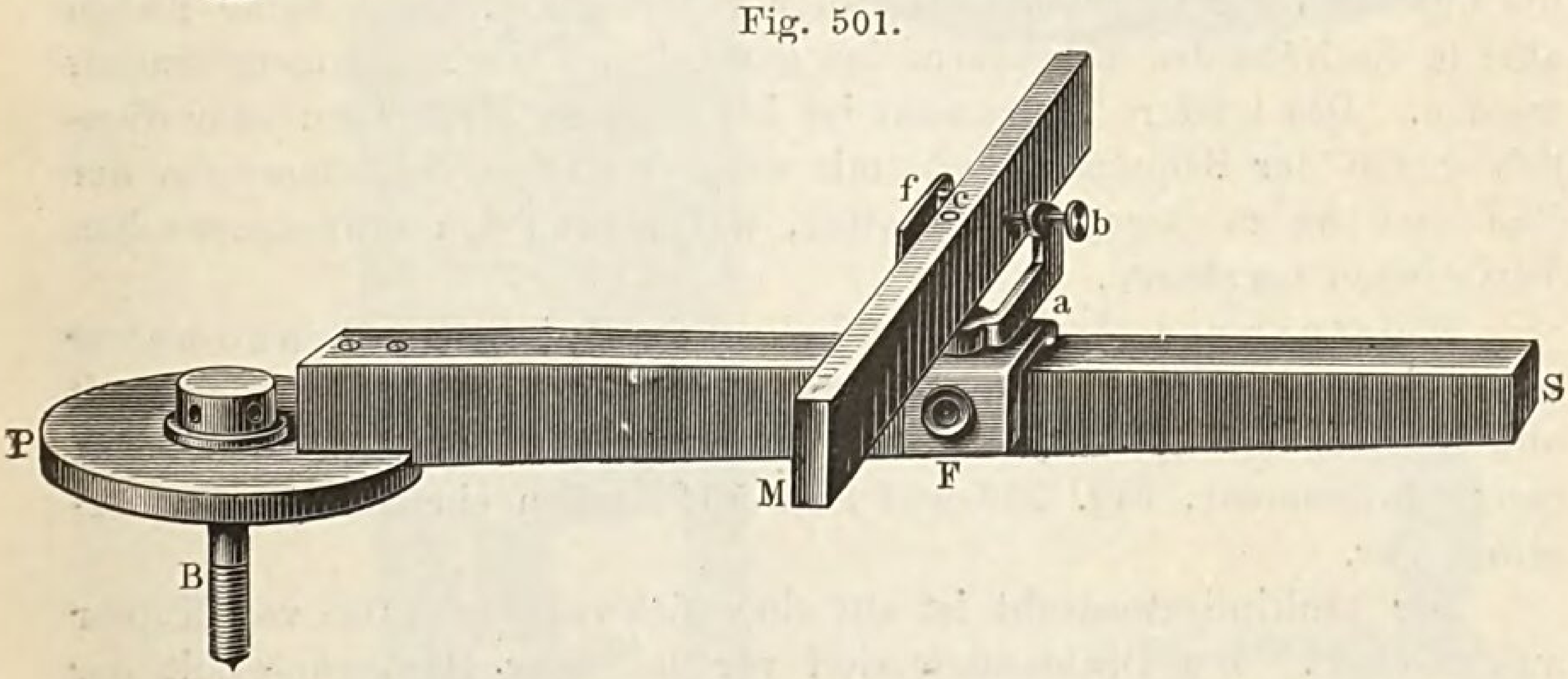


Fig. 501.



wird durch passende Wahl des Rollenpaares *R*, sowie durch geeignete Entfernung der Rollen von der Mitte erreicht.

Von der Astasirungsvorrichtung sind in Fig. 500 und 501 zwei Constructionen abgebildet*), bei welchen man den Magnetstab *M* auf einen Schlitten *F* legt, der auf einer eigens befestigten Holzschiene *S* sitzt. Die Aufstellung dieser Instrumente ist vorzunehmen wie folgt.

Die Schiene *S* wird vermittelst ihrer Auflageplatte *P* und des Bolzens *B* auf dem Consol festgeschraubt, auf welchem auch das Galvanometer steht, wobei die Mittellinie der Schiene *S* entweder parallel

*) Edelmann, Neuere Apparate, S. 160.

zum magnetischen Meridian oder in der Aequatorialebene stehen und die Drehaxe der zu astasirenden Nadel durchschneiden muss. Man bringt dann den Schlitten *F*, jedoch ohne Magnet *M*, auf die Schiene, stellt ein Scalenfernrohr auf den Spiegel des Instrumentes ein, dessen Nadel sich jetzt in der Anfangslage befindet. Hierauf legt man den Magnetstab auf den Schlitten, wobei seine Lage bezüglich des Drehstiftes *c* und zwischen der Mikrometerschraube *b* (*g*) und einer Messingfeder *f* in beiden Figuren ersichtlich ist. In beiden Constructionen kann derselbe nunmehr grob bei *a* (nur aus Fig. 501 zu entnehmen) in den Meridian gedreht werden. Eine Klemmschraube sichert hier seine Lage. Nun wird der Magnet vermittelst der Mikrometerschraube *b* (*g*) so weit gedreht, bis die Magnetnadel, durch das Ablesefernrohr beobachtet, ihre Anfangslage in der Declinationsebene wieder erlangt hat. Indem man nun den Schlitten *F* durch Schieben entlang der Schiene *S* an die Nadel entsprechend nähert, und dabei die Anfangslage der Nadel mit Hülfe der Mikrometerschraube *b* (*g*) stets wieder herstellt, kann man die Empfindlichkeit des Galvanometers etc. beliebig erhöhen.

Beide Instrumente unterscheiden sich dadurch, dass bei dem einfachen Hauy'schen Stabe die mikrometrische Drehung der Schraube *b* direct mit der Hand geschieht, bei dem du Bois'schen Apparate, Fig. 500, jedoch mit Hülfe einer Schnur *s*, welche von den Rollen *r* geführt, sich um den Kopf der Mikrometerschraube *g* herumlegt, deren beide Enden aber in die Nähe des Ablesefernrohrs geführt und hier zusammengeknüpft werden. Das letztere Instrument ist bei feineren Messungen sehr dienlich wegen der Bequemlichkeit, mit welcher es den Veränderungen der Nadelstellung zu begegnen gestattet, welche von den erdmagnetischen Variationen herrühren.

Meissner und Meyerstein haben ein Spiegelgalvanometer construirt, bei welchem man die Astasie ebenfalls mit grosser Sicherheit und Leichtigkeit nach Bedürfniss reguliren kann. Fig. 502 stellt das ganze Instrument, Fig. 503 und Fig. 504 stellen einzelne Theile desselben dar.

Der Multiplicatordraht ist auf eine dickwandige Hülse von Kupfer aufgewickelt. Die Drahtenden sind vor leitender Berührung mit der Kupferhülse geschützt, auf der einen Seite zur Messingplatte *p*, Fig. 503, auf der anderen Seite zur entsprechenden, in der Figur aber fast ganz verdeckten Messingplatte *p'* geführt. Durch Platten von Kammmasse ist eine leitende Berührung von *p* und *p'* mit der Kupferhülse verhindert, während jede der Platten *p* und *p'* einen Metallzapfen trägt, von denen der eine in der Messinggabel *g*, der andere in der Messinggabel *g'* auf der anderen Seite liegt. Von *g* führt ein Messingstreifen zur Klemmschraube *k*, von *g'* zur Klemmschraube *k'*.

Fig. 503 stellt die Kupferhülse mit den Multiplicatorwindungen so dar, als ob nur ein Draht aufgewickelt wäre. In der That sind aber zwei Drähte isolirt von einander neben einander aufgewickelt, und es

Fig. 502.

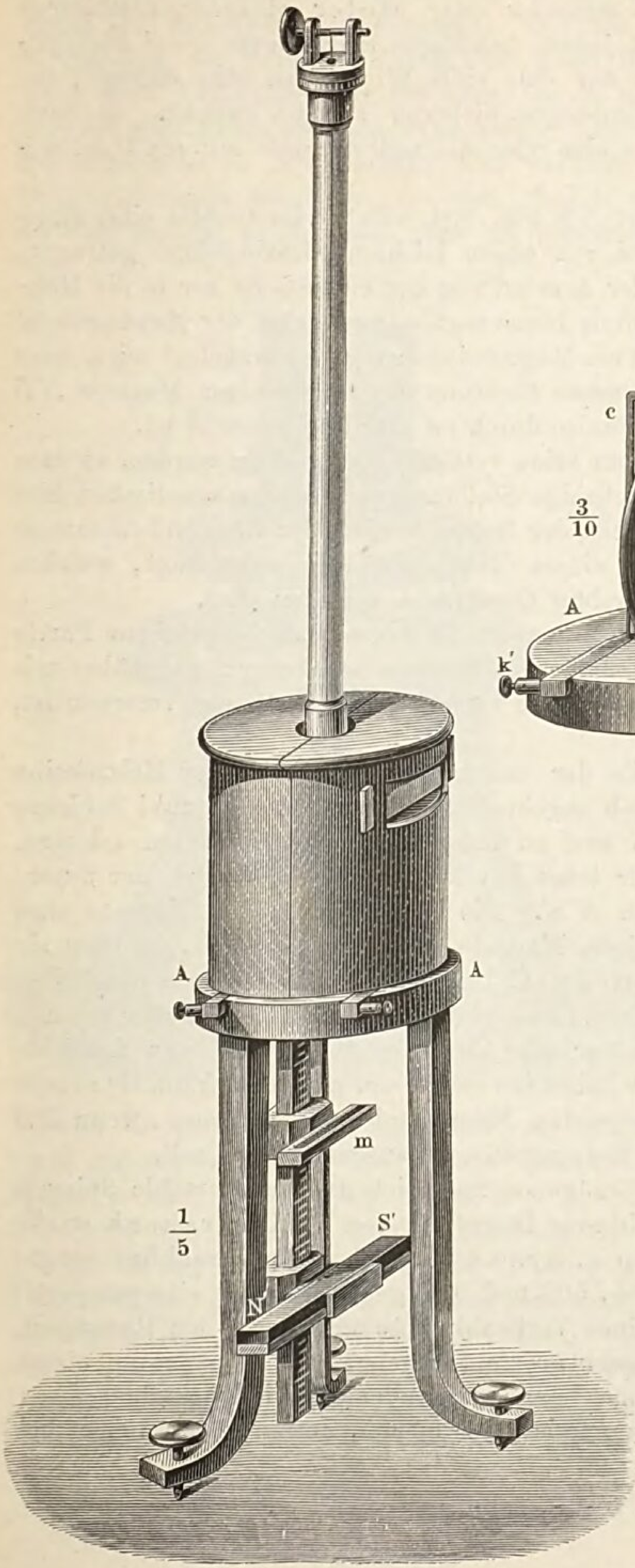


Fig. 503.

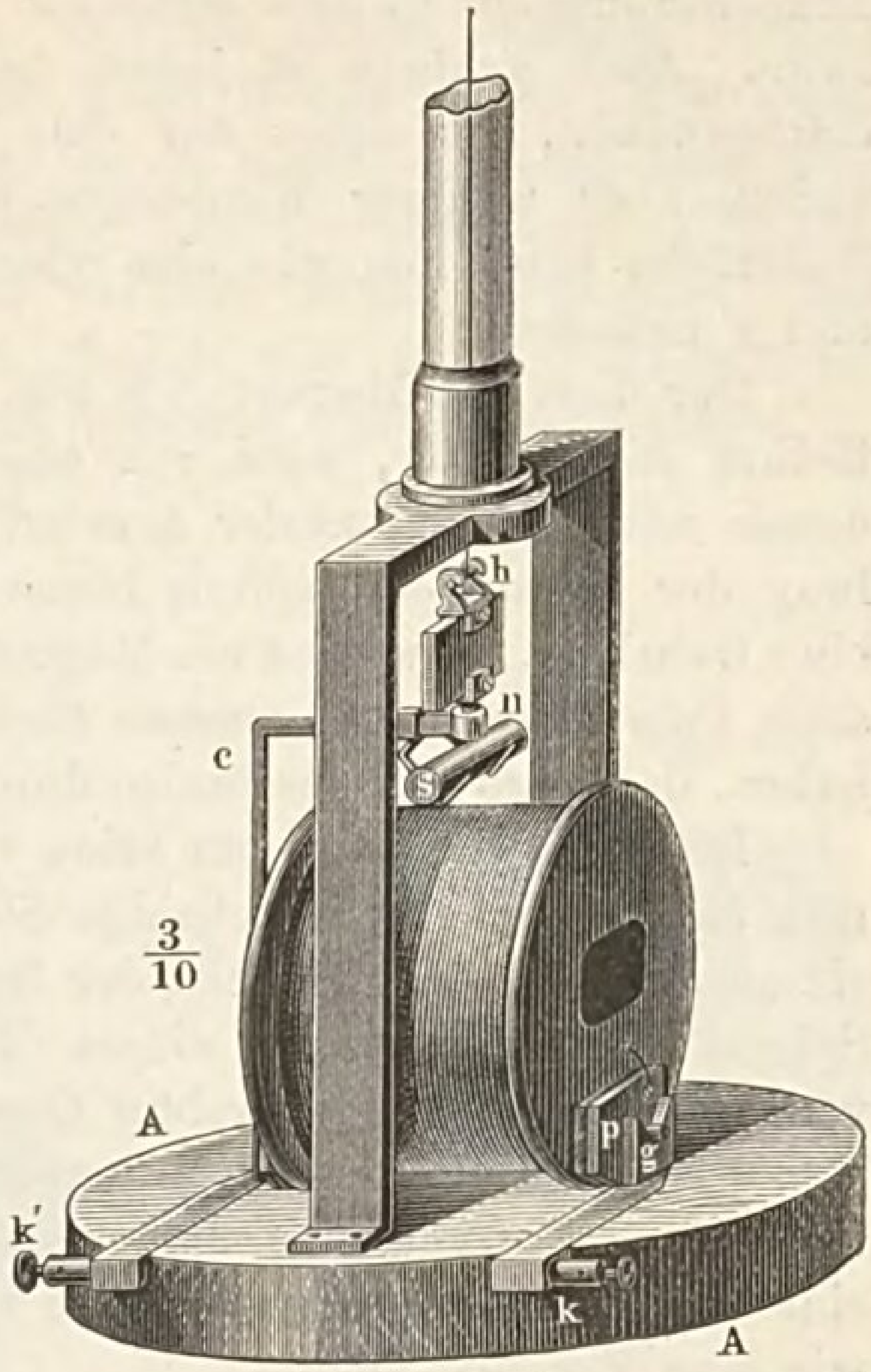
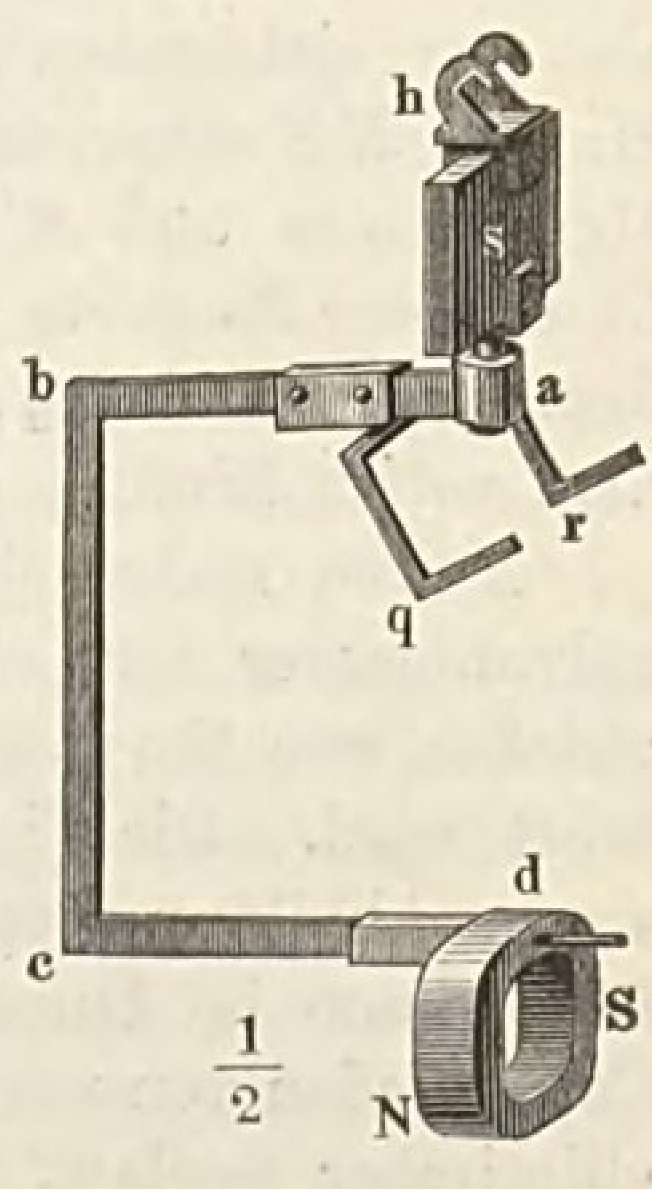


Fig. 504.



ist dann die Einrichtung getroffen, dass man nach Bedürfnis die beiden Drahtwindungen neben einander oder hinter einander combiniren kann. Auch gehören zu jedem derartigen Instrumente zwei Multiplicatorgewinde, von denen das eine viele Windungen sehr dünnen, das andere aber weniger Windungen dickeren Drahtes enthält. Je nach Bedürfniss kann man die eine oder die andere Spule auf die Gabeln g und g' auflegen.

Der drehbare Magnet NS, Fig. 504, welcher die Gestalt eines elliptisches Ringes hat, wird von einem leichten Messingbügel getragen, dessen unterer horizontaler Arm cd von der einen Seite her in die Höhlung der Multiplicatorspirale hineinragt. Oben trägt der Messingbügel eine Gabel qr, in welche ein Magnetstäbchen sn so eingelegt wird, dass seine Pole die entgegengesetzte Richtung des ringförmigen Magnets NS haben, dass also NS theilweise durch sn astatisch gemacht ist.

Der Spiegel s kann um seine verticale Axe gedreht werden, so dass man seiner Ebene jede beliebige Stellung gegen den magnetischen Meridian geben kann. Mittelst der Haken h wird der Bügel $abcd$ sammt Spiegel und Magneten an einem Messingstäbchen aufgehängt, welches von einem Bündel umgedrehter Coconfäden getragen wird.

Um den Luftzug abzuhalten, ist die ganze eben besprochene Partie mit einem Holzkästchen umgeben, welches dem Spiegel gegenüber mit einer durch eine Spiegelglasplatte verschlossenen Oeffnung versehen ist, wie man Fig. 502 sieht.

An der unteren Seite der von drei Füssen getragenen Holzscheibe AA ist ein verticaler Stab angebracht, an welchem sich zwei Schieber auf und nieder bewegen und an beliebiger Stelle festklemmen lassen. Der obere dieser Schieber trägt den kleinen Magnetstab m, der untere den grösseren Magnetstab $N'S'$. Die Pole dieser beiden Magnete sind mit denen des ringförmigen Magnets NS gleichgerichtet, so dass sie also der richtenden Kraft des Erdmagnetismus auf dem beweglichen Magnet NS entgegenwirken. Je nachdem man nun die Schieber mit den Magneten m und $N'S'$ höher oder tiefer feststellt, kann man den Einfluss dieser Magnete nach Belieben modificiren, oder man kann sie sammt dem in der Gabel qr liegenden Magnetstab ganz entfernen, wenn NS dem vollen Einfluss des Erdmagnetismus ausgesetzt sein soll.

Durch mehrfache Vorzüge zeichnet sich das transportable Spiegelgalvanometer mit regulirbarer Dämpfung von F. Kohlrausch aus*), welches von Hartmann u. Braun in Bockenheim-Frankfurt ausgeführt wird. Die Fig. 505, 506 und 507 geben hiervon eine perspectivische Abbildung und einen Verticaldurchschnitt durch den Haupttheil. Der 18 mm im Durchmesser grosse Spiegelmagnet m hängt an einem Conconfaden von nur 20 mm Länge innerhalb eines Windungsrahmens von elliptischer Gestalt, dessen freie Höhe 60 mm, dessen Breite 30 mm be-

*) Wien. Akad. Ber. LXVII, S. 101.

trägt. Der Coconfaden geht zuerst durch eine kleine Oese und wird durch ein Röllchen *r* aufgewickelt. Der aus elektrolytischem Kupfer hergestellte Kupferdämpfer, Fig. 507, passt in den Rahmen und wird, wenn volle Dämpfung verlangt wird, bis zu einem Anschlag über den Magnet geschoben, den eine cylindrische Höhlung aufnimmt. Für den Coconfaden ist in dem Dämpfer eine verticale Rinne ausgespart. Die Drahtwindungen bestehen aus zwei Paaren von Lagen dicken und dünnen Drahtes, so dass man über die relativen Empfindlichkeiten 1, 2,

Fig. 505.

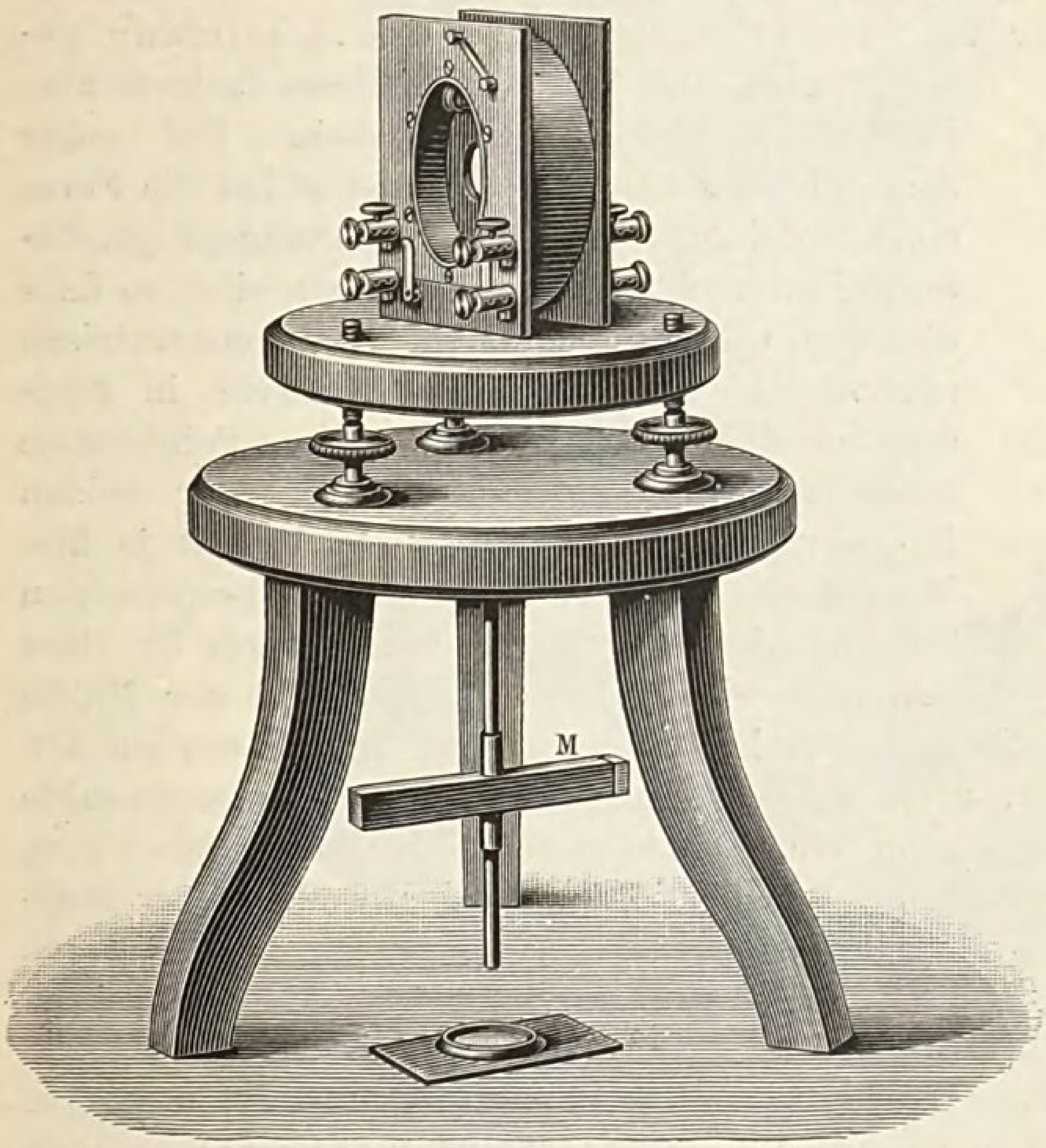


Fig. 506.

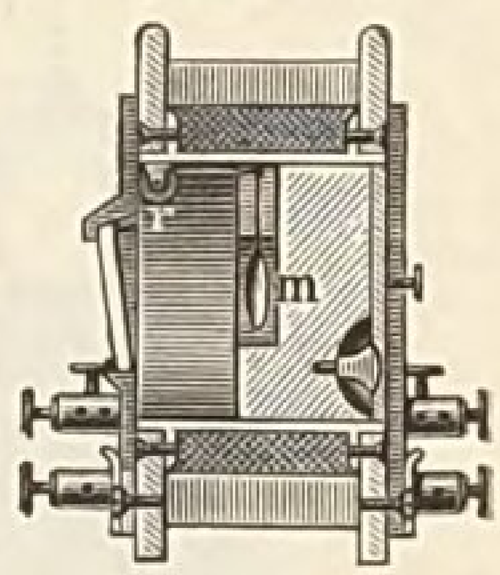
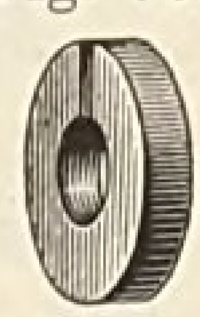


Fig. 507.



10 und 20 verfügt und Stromstärken, die sich wie 1 zu 200 verhalten noch gut messen kann. Die inneren Widerstände der Drahtrollen betragen je nach Combination ungefähr $^1/_8$, $^1/_4$, $^1/_2$, 15, 30, 60 Ohm. Ein Strom von $^1/_{10\,000\,000}$ Amp. giebt noch einen deutlichen Ausschlag. Die Astasirung geschieht durch den Magnet *M* unter dem Tische des Instrumentes, durch dessen Drehung man auch die Beobachtung in die verschiedensten Richtungen verlegen kann. Das Instrument ist sehr leicht transportabel und lässt sich auf jedem Vorlesetisch aufstellen.

Ein sehr bequemes Spiegelgalvanometer, insbesondere auch für objective Darstellung, hat V. v. Lang beschrieben*). Siemens und Halske

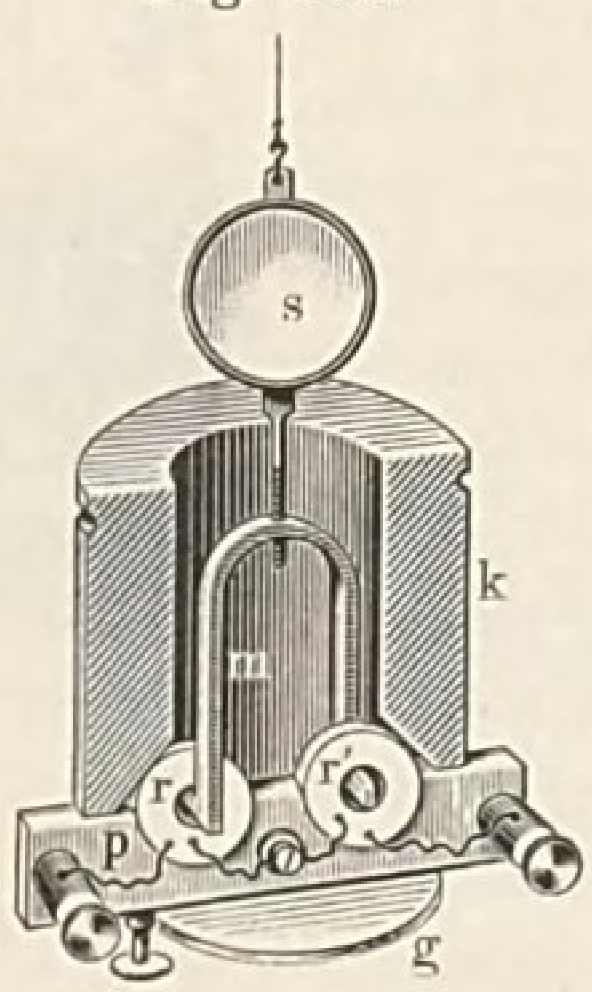
*) Wien. Akad. Ber. LXVII, S. 101.

construirten ferner ein transportables Spiegelgalvanometer mit einer Rolle, ein aperiodisches mit Glockenmagnet und ein astatisches, bei welchem beide Nadeln mit Rollen umgeben sind.

Das transportable Galvanometer enthält einen sehr leichten Hohlspiegel aus Stahl, der an zwei sehr kurzen Coconfäden oben und unten innerhalb einer cylindrischen Röhre aufgehängt ist, welche auch eine dämpfende Kupfermasse enthält. Diese Röhre kann in den Apparat horizontal eingeschoben werden.

Von wesentlich abweichender Construction und durch sehr hohe Empfindlichkeit bei geringem Widerstande sich auszeichnend, ist das Mikro-Galvanometer von Rosenthal*), welches von Edelmann gefertigt wird. Das Wesentliche dieses Instrumentes ist aus der Fig. 508 zu ersehen. Der unter dem Spiegel *s* hängende Magnet *m* hat die Form eines Hufeisens, dessen Pole nach entgegengesetzten Seiten rechtwinklig umgebogen sind, so dass dieselben Quadranten bilden, welche concentrisch zur verticalen Drehaxe des Hufeisens in horizontaler Ebene verlaufen**). Diese Polfortsätze gehen frei durch die Höhlungen der beiden Rollen *r*, *r'* aus Elfenbein, welche mit je 200 Windungen eines 0,05 mm dicken besponnenen Silberdrahtes vom Gesammtwiderstande 30 Ohm bewickelt sind. Diese Rollen sind zur Hälfte in das parallelepipedische Elfenbeinstück *p* eingelassen und werden mit diesem durch die von unten an den kupfernen Dämpfer *k* angeschraubte Glasplatte *g* gehalten. Der die Drahtwindungen durchfliessende Strom wirkt anziehend oder abstossend auf die Polfortsätze, wodurch der Magnet mit dem Spiegel gedreht wird. Das Instrument soll, wenn es durch einen Hauy'schen Magnetstab bis zu Aperiodicität astasirt ist, noch einen Strom von 0,000 000 000 12 Amp. nachweisen lassen.

Fig. 508.



Die hier gegebenen Beschreibungen von Spiegelgalvanometern dürften genügen, um den Leser so weit zu unterrichten, dass er sich auch an abweichenden Constructionen zu orientiren vermag.

173 **Torsionsgalvanometer und Universalgalvanometer von W. Siemens.** Das erstere Instrument, welches in der Elektrotecknik viel benutzt wird, ist in Fig. 509***) abgebildet. Es besteht aus zwei vertical gestellten Multiplicatorgewinden, zwischen welchen an einer Spiralfeder ein Glockenmagnet aufgehängt ist, welcher letztere einen horizontalen Zeiger trägt. Derselbe spielt unterhalb der das Gehäuse

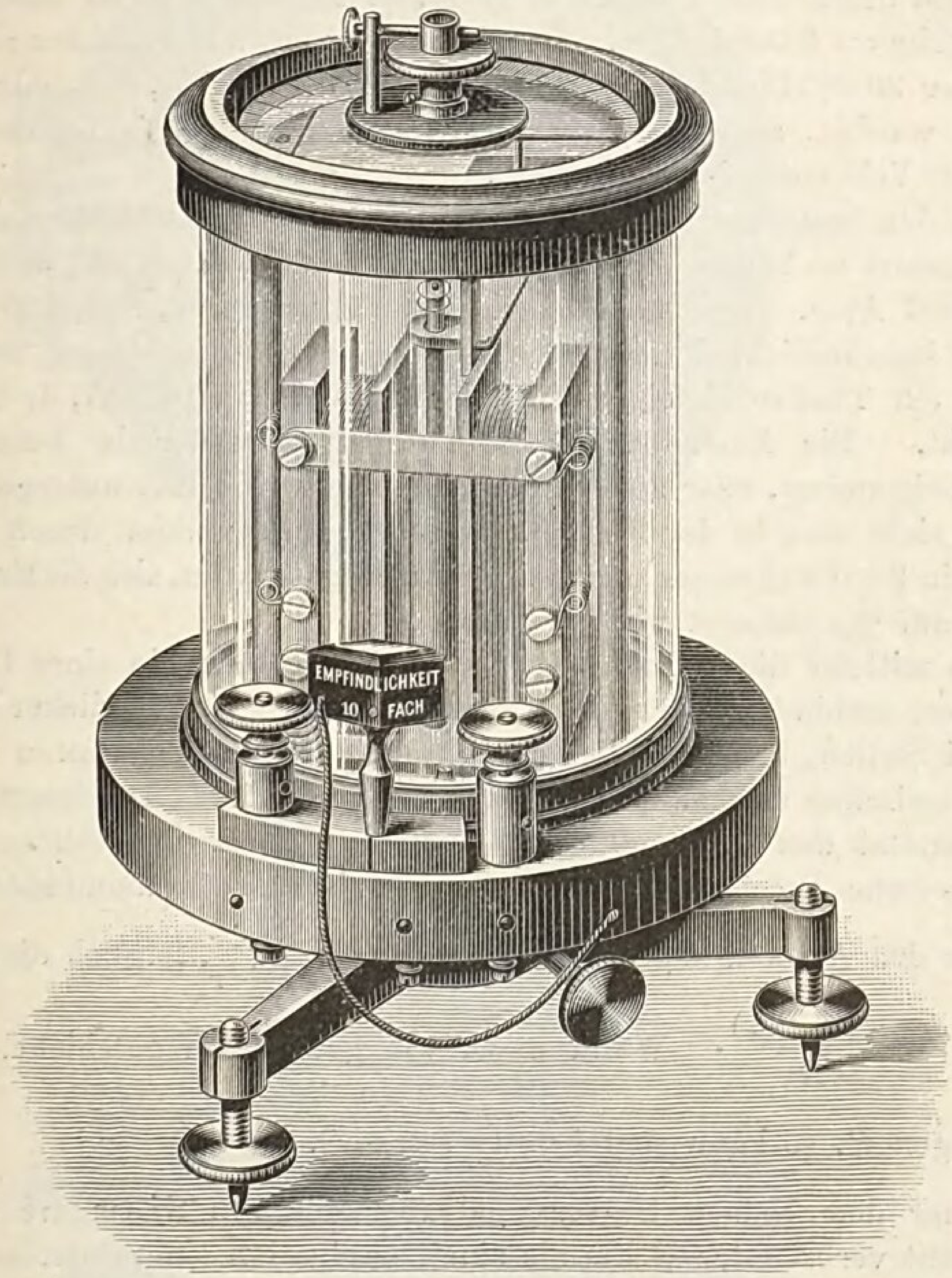
*) Wiedem. Ann. XXIII, 677 (1884).

**) Hartmann hat dieselben neuestens durch zwei in einer horizontalen Ebene liegende, mit einander verbundene halbkreisförmige Magnete ersetzt.

***) Aus Wiedemann's Lehre von der Elektricität entnommen.

bedeckenden Glasplatte auf einem Theilkreise, so dass dessen Rand von oben beobachtet werden kann. Die obere Befestigungsstelle der Spiralfeder selbst ist aber ebenfalls um dieselbe Axe mittelst eines von aussen zugänglichen Knopfes drehbar und diese Drehung durch einen eigenen Zeiger abzulesen. Wenn kein Strom geht, stehen beide Zeiger auf 0. Ist ein Strom vorhanden, so wird der Magnetzeiger abgelenkt. Statt

Fig. 509.



diese Ablenkung zu beobachten, misst man den Drehungswinkel, um welchen man den Spiralzeiger in entgegengesetzter Richtung drehen muss, um den Magnetzeiger wieder auf 0 zu bringen. Diesem Torsionswinkel der Spirale ist innerhalb weiter Grenzen die Stromstärke proportional. Die Theilung des Instrumentes ist aber so eingerichtet, dass dieselbe direct nicht Stromstärken, sondern Potentialdifferenzen nach Volt angiebt. Da nämlich bei gleichbleibendem Widerstande die Stromstärke proportional der Potentialdifferenz an seinen Enden ist, so muss

auch der gemessene Torsionswinkel proportional der Potentialdifferenz an den Drahtenden des Instrumentes (der Klemmspannung) sein. Die Firma Siemens und Halske liefert das Instrument in zwei Empfindlichkeitsgraden (jede der beiden überdies auch in liegender Anordnung, welche aber weniger Sicherheit gewährt).

Bei den Instrumenten für schwächere Ströme oder geringere Potentialdifferenzen beträgt der Widerstand des Multiplicators 100 Ohm, ein Theilstrich des Kreises entspricht 0,01 Volt Klemmspannung oder einer Stromstärke = 0,0001 Amp. Durch Zusatz von Widerständen = 900, 9900 oder 99 000 Ohm kann die Empfindlichkeit auf $^1/_{10}$, $^1/_{100}$ oder $^1/_{1000}$ reducirt werden, so dass ein Theilstrich einer Potentialdifferenz von 0,1, 1, 10 Volt entspricht.

Bei den Instrumenten für stärkere Ströme ist der Widerstand des Multiplicators = 1 Ohm, ein Theilstrich des Kreises entspricht 0,001 Volt oder 0,001 Amp. Durch Zusatzwiderstände = 9, 99, 999, 9999 Ohm wird die Empfindlichkeit wiederum auf $^1/_{10}$, $^1/_{100}$, $^1/_{1000}$, $^1/_{10\,000}$ reducirt, so dass ein Theilstrich einer Potentialdifferenz = 0,01, 0,1, 1, 10 Volt entspricht. Die Zustandswiderstände sind entweder in besonderen Kästen beigegeben, oder auch in dem Instrumente selbst untergebracht. So z. B. sieht man in der Fig. 509 den Stöpsel abgebildet, durch dessen Ziehen ein 9mal so grosser Widerstand mit eingeschaltet, also die Empfindlichkeit auf $^1/_{10}$ reducirt werden kann.

Um mittelst dieses Instrumentes die Stromstärke in einer Leitung zu messen, verbindet man seine Klemmen mittelst kurzer, dicker Drähte mit zwei Stellen, a und b, dieser Leitung, die einen bekannten Widerstand r zwischen sich haben. Ist der Widerstand des Torsionsgalvanometers sammt den eventuell eingeschalteten Zusatzwiderständen $= R$, die gemessene Potentialdifferenz $= v$, so ist der Gesammtwiderstand zwischen den Abzweigungsstellen a und $b = \frac{R r}{R + r}$, folglich die Stromstärke $i = \frac{v(R + r)}{R r}$. Wählt man, wie gewöhnlich geschieht, r sehr klein gegen R, so kann man $i = \frac{v}{r}$ setzen*).

Unter dem Namen Universalgalvanometer von Siemens ist ein Instrument verbreitet, welches als eine Combination eines Galvanometers mit der Wheatstone'schen Brücke betrachtet werden kann und sowohl zur Messung von elektromotorischen Kräften, als auch von Widerständen und Stromstärken bequem zu verwenden ist. Dasselbe besteht (Fig. 510 und 511) aus einer kreisförmigen Holzplatte AA, in deren Mittelpunkt sich auf einem verticalen Zapfen eine ungefähr 2,5 cm dicke

*) Siehe die dem Instrumente beigegebene Gebrauchsanweisung, sowie die Erläuterungen dazu von A. v. Waltenhofen (Zeitschr. f. Elektrotechnik in Wien, IV, S. 98 u. 151).

Holzscheibe C dreht, auf deren seitlichem Fortsatze c vier mit Klemmschrauben versehene Metallplatten I bis IV befestigt sind, von denen III und IV mittelst eines Metallstöpsels verbunden werden können. Auf

Fig. 510.

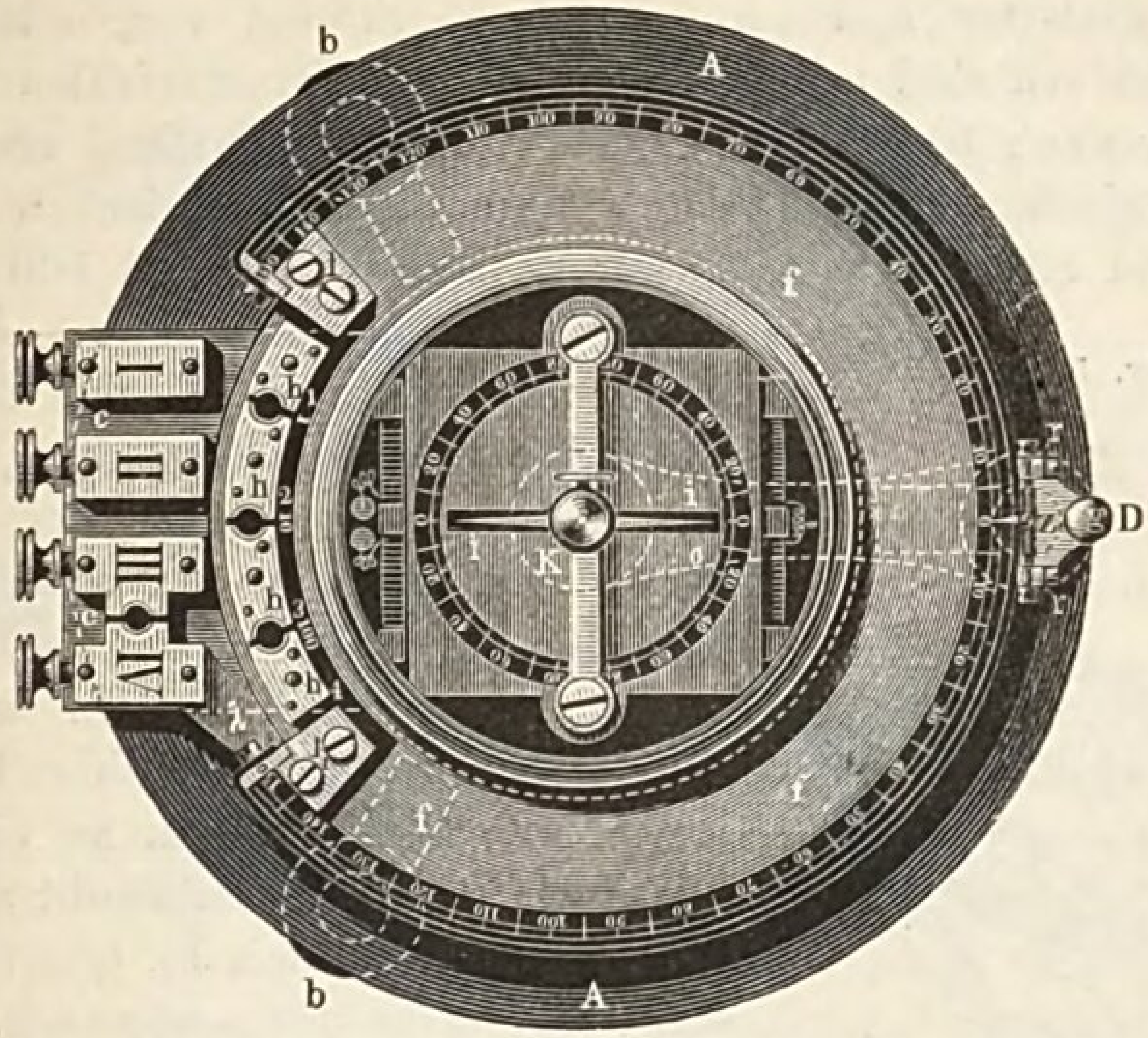
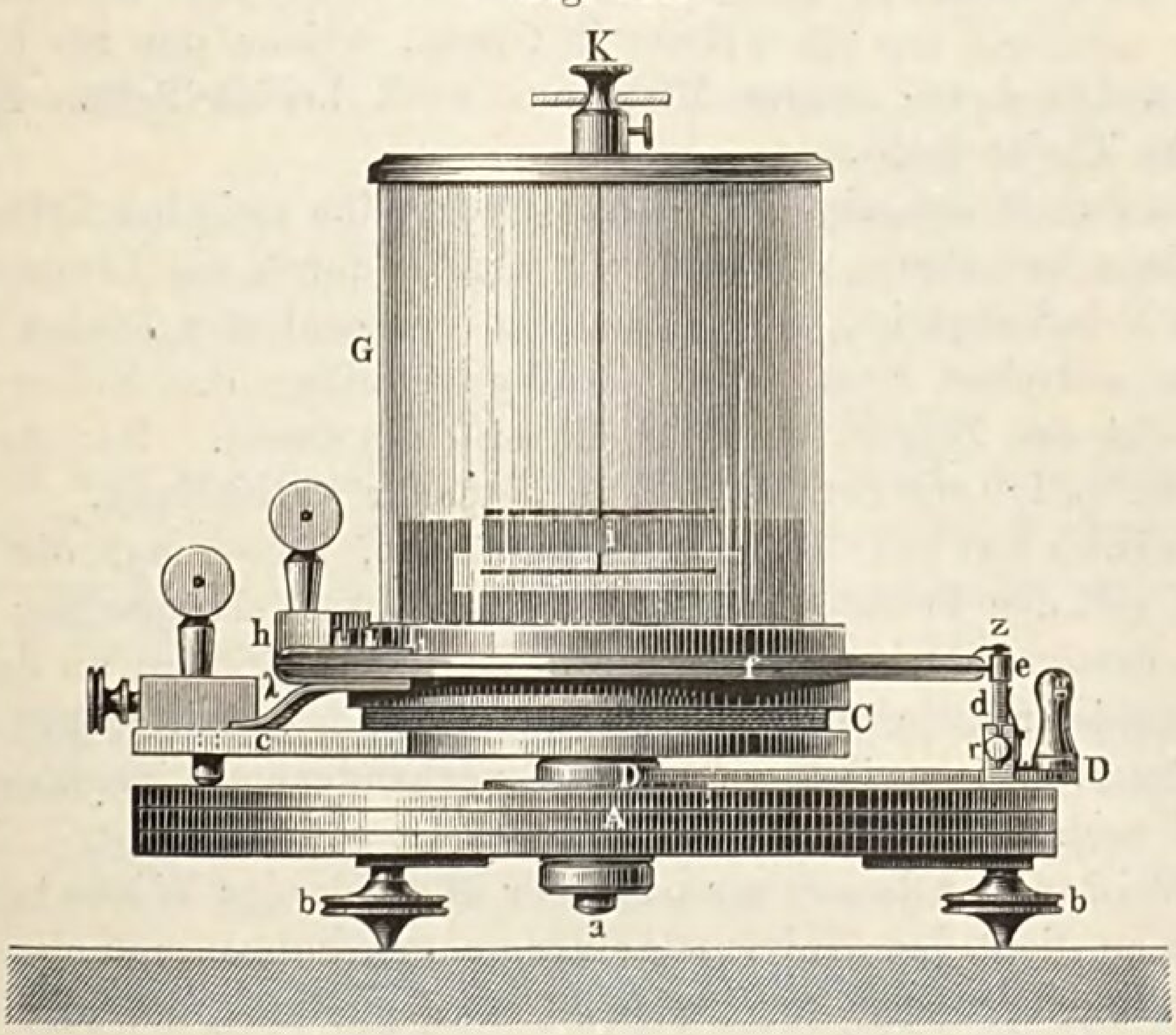


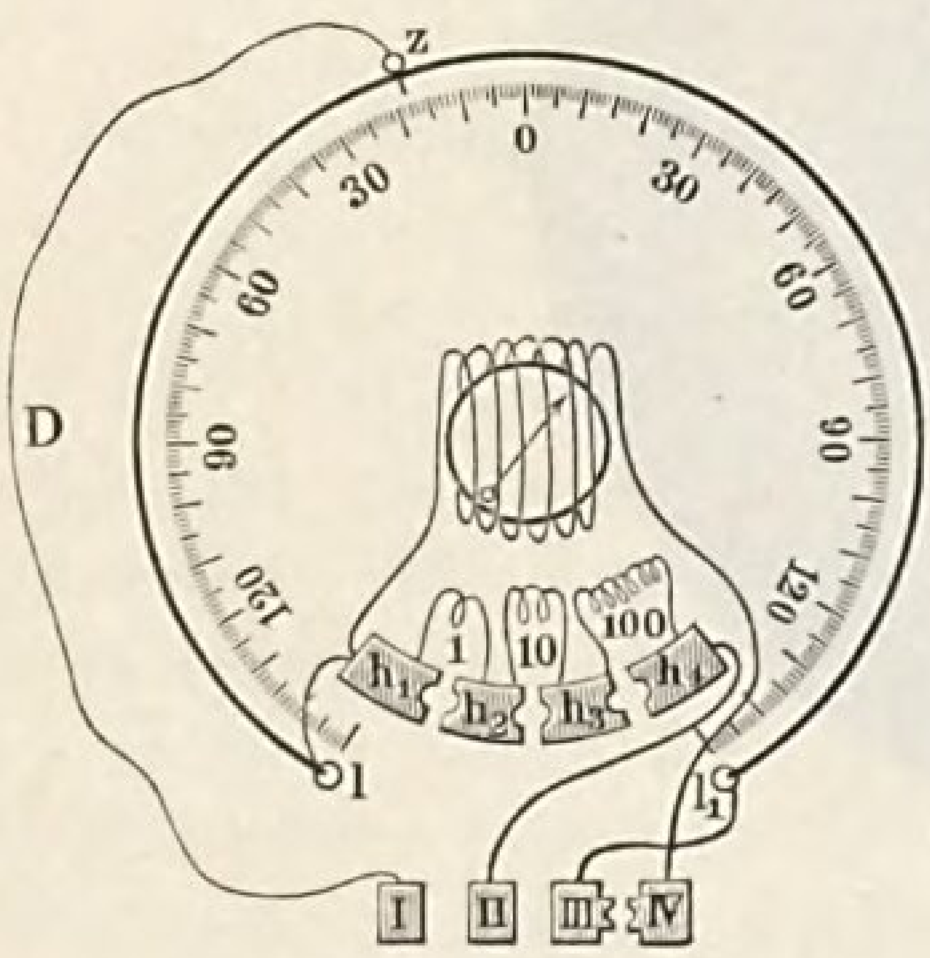
Fig. 511.



der Holzscheibe ruht eine kreisrunde Schieferplatte f, welche über den Platten I bis IV ausgeschnitten ist, und ein gewöhnliches Galvanometer mit einer an einem Coconfaden hängenden astatischen Nadel trägt, welche letztere durch einen kleinen Magnet compensirt werden kann,

der an dem den Faden tragenden Knopfe k befestigt ist. Rechts und links, 20 Grade von der Nulllage entfernt, wird die Nadel durch Elfenbeinsäulchen aufgehalten. Die Drahtwindungen des Galvanometers haben einen Widerstand = 10 S. E. Am Rande der Schieferplatte befinden sich vier Metallplatten h_1 bis h_4, die durch Stöpsel verbunden werden können. Dieselben sind mit den Enden dreier Drahtspiralen von 1, 10 und 100 (oder auch 10, 100 und 1000) S. E. Widerstand verlöthet, so zwar, dass zwischen h_1 und h_2 der Widerstand 1, zwischen h_2 und h_3 der Widerstand 10, zwischen h_3 und h_4 der Widerstand 100 ein- und ausgeschaltet werden kann. Ausserdem ist h_4 mit Platte II, h_1 mit dem einen Ende des Galvanometerdrahtes, Platte IV mit dem anderen Ende des letzteren verbunden, wie Fig. 512 erkennen lässt. Am Umfange der Schieferplatte ist eine flache Rinne eingedreht, in welche ein Platindraht zur Hälfte seiner Dicke versenkt ist, dessen Enden an die Metallplatten l und l_1 angeschraubt sind. Von den letzteren ist l mit h_1, l_1 mit III durch dicke Kupferstreifen verbunden. Auf der Schiefertafel befindet sich eine Kreistheilung in Grade, welche den am Umfange eingelegten Draht von seiner Mitte aus nach beiden Seiten zu in je 150 gleiche Theile theilt.

Fig. 512.



Gegen den Draht wird durch eine Feder eine zwischen Spitzen laufende Rolle e aus Platin angedrückt, welche durch die Theile d, r an dem Arme D befestigt ist, welcher sich um den centralen Zapfen mittelst des Griffes g drehen lässt. Die jeweilige Stellung des Rollencontacts wird mittelst des Zeigers z am Theilkreise abgelesen. Der Arm, also auch die Rolle, ist mit der Platte I in leitender Verbindung.

Als Sinusbussole dient das Instrument, indem man die Platten II und IV mit den Polen verbindet und dann das Galvanometer so weit dreht, bis dessen Nadel auf Null steht. Die Drehung wird an der Theilung der Schieferplatte an dem Zeiger z, den man vorher auf 0^0 gestellt hat, abgelesen. Die zwischen h_1 und h_4 vorhandenen Widerstände können dabei nach Bedarf ein- oder ausgeschaltet werden.

Als Widerstandsmesser nach der Methode der Wheatstone'schen Brücke dient das Universalgalvanometer, indem man die Platten I und II mit einem Elemente verbindet, den zu messenden Widerstand zwischen II und IV einschaltet, ferner den Stöpsel zwischen III und IV einsetzt. Zwischen h_1 und h_4 schaltet man dann jenen Widerstand ein, der dem zu messenden der Grösse nach am nächsten steht und stellt dann den Rollencontact so, dass kein Ausschlag erfolgt. Es verhält sich dann der zu messende Widerstand W zu dem Widerstande R

zwischen h_1 und h_4, wie der Bogen $l_1 z$ zu dem Bogen lz. Dass dies sich so verhält, findet man leicht, wenn man zuerst das Schema der Fig. 512 unter Einschaltung des Elementes E und des Widerstandes W nach Fig. 513 umgestaltet, dann R mit zl' vertauscht, was bekanntlich gestattet ist, worauf man durch eine einfache Umstellung auf die gewöhnliche Form der Wheatstone'schen Brücke gelangt (§. 138).

Fig. 513.

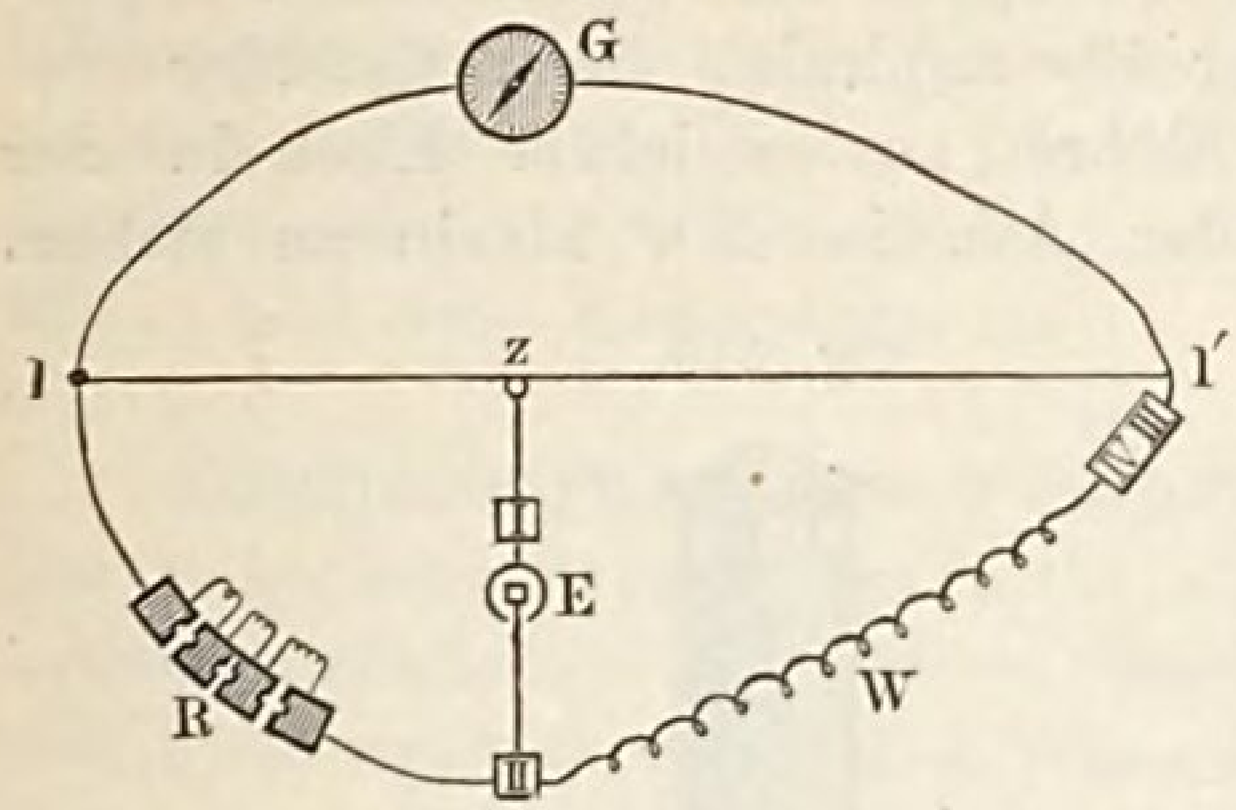
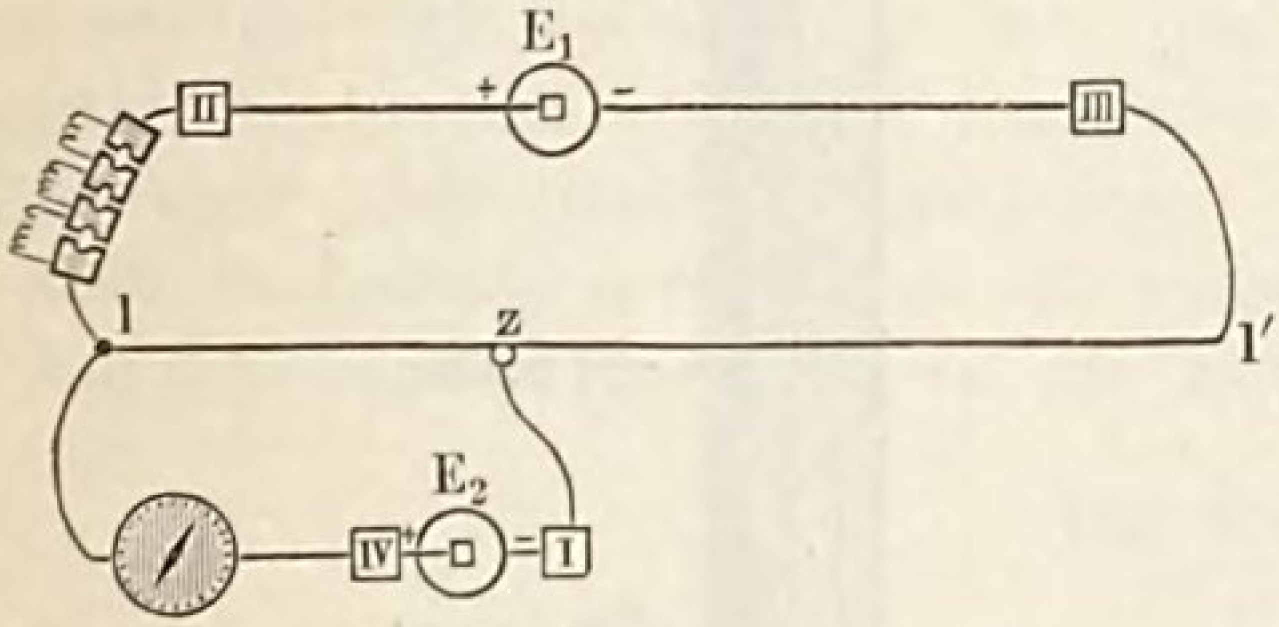


Fig. 514.



Als Compensator nach Dubois-Reymond's Methode (§. 141 II) dient das Instrument zur Vergleichung elektromotorischer Kräfte auf folgende Weise. Man entfernt den Stöpsel zwischen III und IV, setzt alle Stöpsel zwischen h_1 und h_4 ein, verbindet dann II und III mit den Polen eines constanten (stärkeren) Elementes E_1. Hierauf schaltet man nach einander zwischen I und IV die mit einander zu vergleichenden Elemente, deren elektromotorischen Kräfte E_2 und E'_2 seien, ein und zwar so, dass I und III gleichnamige Pole werden. Hat man dann jedesmal den Contact so gestellt, dass kein Ausschlag erfolgt, wobei die Zeigerstellungen z und z' waren, so gilt:

$$E_2 : E'_2 = lz : lz'.$$

Zeichnet man sich nämlich die Verbindungen nach dem übersichtlichen Schema Fig. 514, so erkennt man darin sofort die Zusammenstellung, welche wir §. 141, Fig. 414 beschrieben haben, wobei das Stück $B'C$ dieser Figur dieselbe Rolle spielt, wie lz in Fig. 514.

Elektrotechnische Messinstrumente, Ampèrmeter und 174
Voltmeter. Ausser den beschriebenen Instrumenten sind noch eine Unzahl zum Theil wenig empfehlenswerther Instrumente beschrieben worden, welche in der Elektrotechnik zum Messen von Stromstärken und Potentialdifferenzen (Spannungen) benutzt werden. Die Strommesser werden gewöhnlich abgekürzt Ampèrmeter oder Ammeter, die Spannungsmesser Voltmeter*) genannt. Die letzteren sind im Wesentlichen nichts Anderes als Strommesser von grosser Empfindlichkeit und grossem

*) Nicht zu verwechseln mit Voltameter.

Widerstande und werden in ähnlicher Weise wie das Torsionsgalvanometer gebraucht, da ihre Scala direct auf Volt geaicht ist.

Wir wollen von diesen Instrumenten hier nur das Federgalvanometer von F. Kohlrausch beschreiben, welches sich durch seine Handlichkeit beim Experimentiren empfiehlt. Es beruht auf der später zu besprechenden Eigenschaft einer Stromspirale, einen Cylinder oder auch eine Röhre aus weichem Eisen in der Richtung der Axe in sich hinein zu ziehen.

Fig. 515.

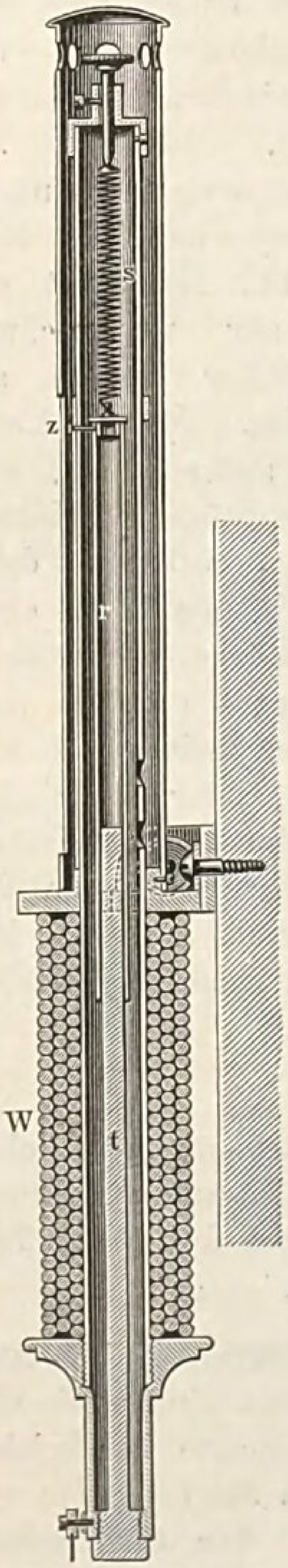
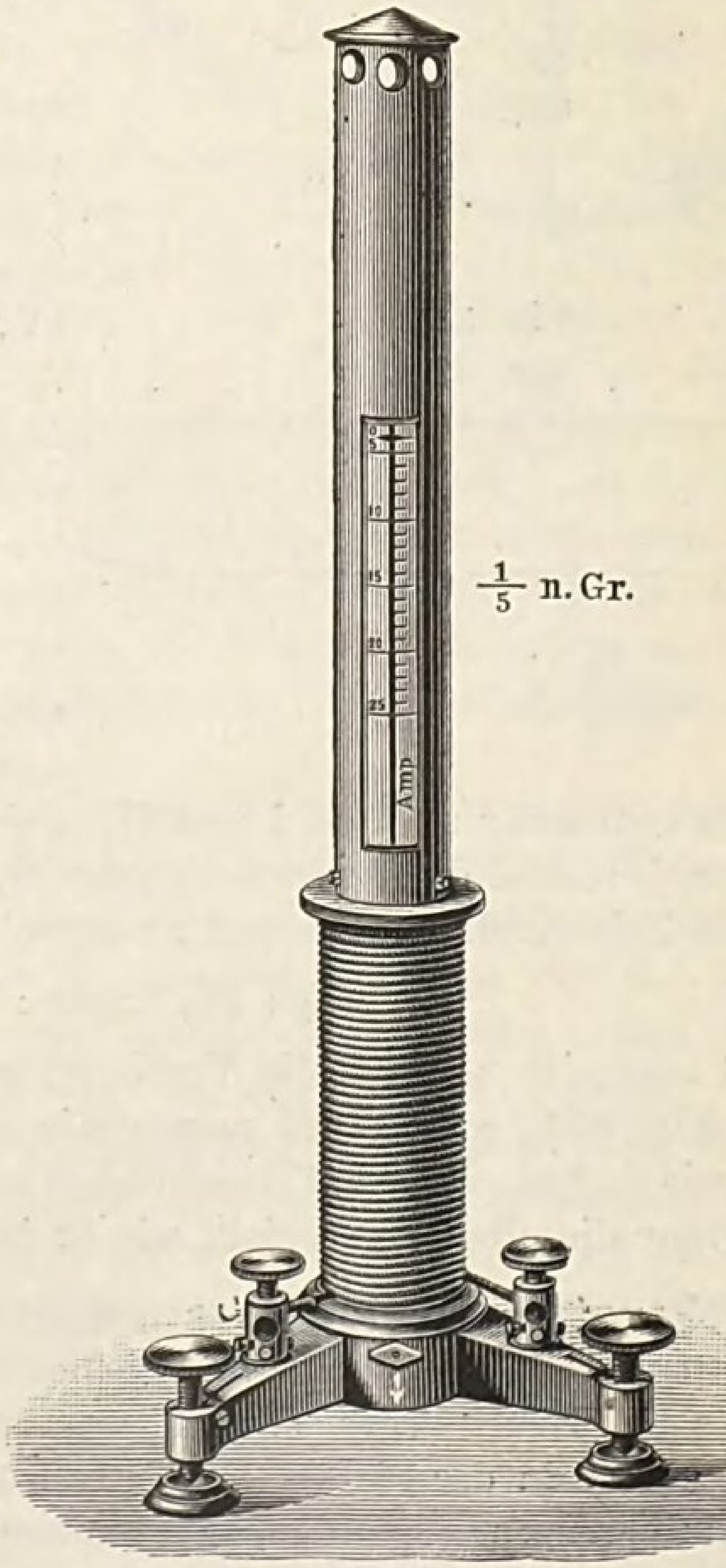


Fig. 516.



$\frac{1}{5}$ n. Gr.

Die Figuren 515 und 516 zeigen solche Instrumente in der Ausführung von Hartmann und Braun, und zwar Fig. 515 im Durchschnitt und zum Befestigen an der Wand eingerichtet, Fig. 516 in äusserer Ansicht mit Dreifuss zum Stellen. Die Röhre *r* aus weichem Eisen hängt an der vielgewundenen Stahldrahtspirale *s* und wird, wenn

durch die Windungen in *W* ein Strom circulirt, vorübergehend magnetisirt und über den Führungsstab *t* nach abwärts gezogen. Diese Bewegung wird durch den Zeiger *z* an einer verticalen Scala ersichtlich gemacht. Da die Bewegung des Zeigers nicht proportional der Stromstärke stattfindet, so ist eine empirische Scala erforderlich; daneben ist noch eine Millimeterscala aufgetragen. Eine Umhüllungsröhre mit Glimmerfenster schützt die Scala und befördert durch Luftzug die Kühlhaltung der inneren Theile. Die Instrumente reichen von 1 bis 30 Milliampères, oder von 0,5 bis 5 Amp. oder von 1 bis 20 Amp. oder höher bis zu 600 Amp. und mehr.

Magnetisirung des weichen Eisens durch den Strom. 175

Der elektrische Strom wirkt nicht allein richtend auf den freien Magnetismus, sondern er ist auch im Stande, magnetisirend auf weiches Eisen und Stahl zu wirken. — Um einen Eisenstab kräftig zu magnetisiren, muss man den Strom mehrfach um denselben herumführen, was dadurch geschieht, dass man den mit Seide oder Wolle übersponnenen Leitungsdraht spiralförmig um das Eisen herumwindet. Statt die Drahtwindungen direct auf dem Eisen anzubringen, ist es aber zweckmässiger, den Draht auf eine Spule von Holz (damit man die Spirale auch zu Inductionsversuchen anwenden kann) aufzuwinden und den zu magnetisirenden Eisenstab in die Höhlung derselben hineinzuschieben.

Fig. 517.

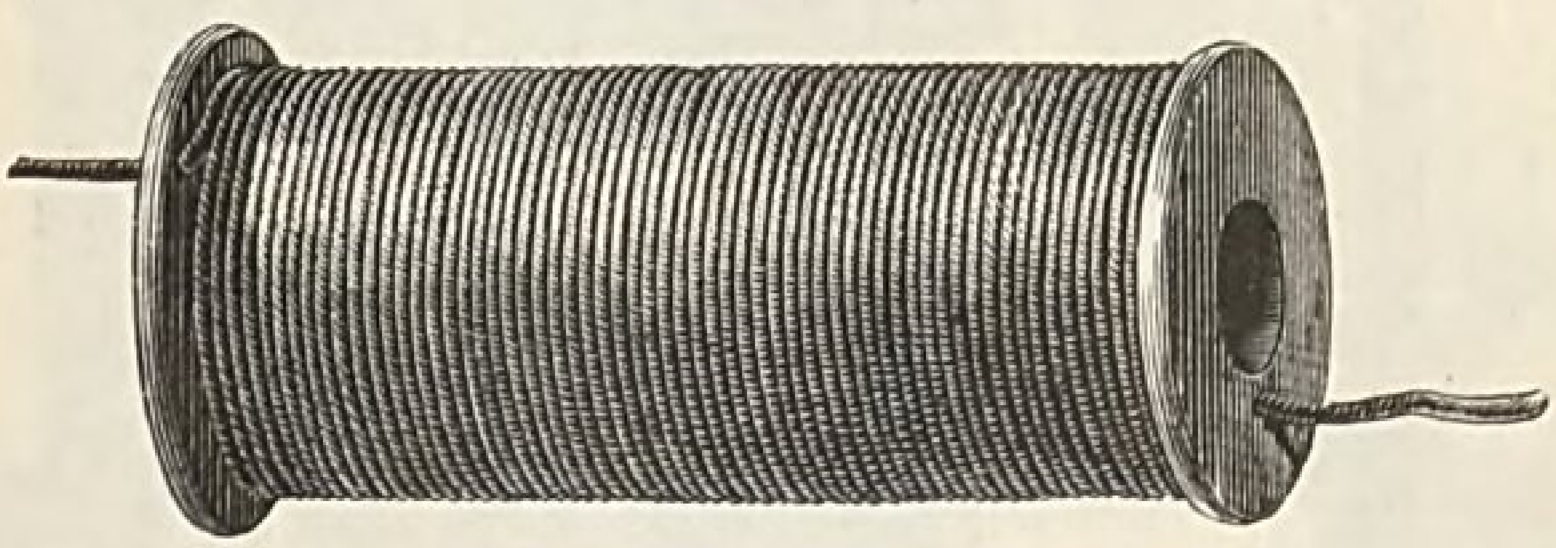


Fig. 517 stellt eine solche Magnetisirungsspirale dar. Man hat deren von sehr verschiedenen Grössen und Drahtdimensionen. Für sehr kräftige Wirkungen werden Magnetisirungsspiralen angewandt, welche aus 800 bis 1000 Windungen eines 1 bis 2 mm dicken Kupferdrahtes bestehen, die natürlich in mehreren Lagen über einander liegen.

Schiebt man nun einen Eisenstab in eine solche Spirale hinein, so wird er magnetisch, sobald ein elektrischer Strom die Spirale durchläuft. Ein solcher temporär magnetisirter Stab wird Elektromagnet genannt. Ragen die Enden des Eisenstabes aus der Spirale hervor, so kann man Eisenstücke an dieselben anhängen. Sobald der Strom unterbrochen wird, verliert der Magnet den grössten Theil seiner Kraft, doch bleibt in Folge gegenseitiger Influenz noch Magnetismus an den Polen und dem daran hängenden Eisen zurück, welcher stark genug sein kann, das sofortige Abfallen des letzteren zu verhindern.

Was die Polarität der beiden Enden des Eisenstabes betrifft, so ist dieselbe nach den Bemerkungen am Schlusse des §. 168 leicht zu bestimmen; dasjenige Ende, welches, dem Beschauer zugewendet, vom positiven Strom in der Richtung umkreist erscheint, in welcher sich der Zeiger einer Uhr dreht, ist der Südpol, d. h. derjenige Pol, welcher sich nach Süden richten würde, wenn der Elektromagnet sich frei in der Horizontalebene drehen könnte.

Fig. 518.

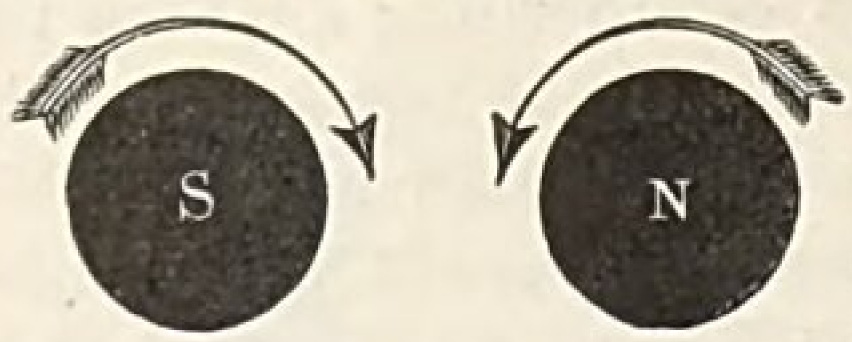


Fig. 518 dient, um das Gesetz der Polarität zu erläutern.

Wie den Stahlmagneten, so giebt man auch den Elektromagneten eine U-förmige Gestalt, wenn man eine grosse Tragkraft erzielen will. Um die Gesetze der Tragkraft solcher Elektromagnete zu untersuchen,

Fig. 519.

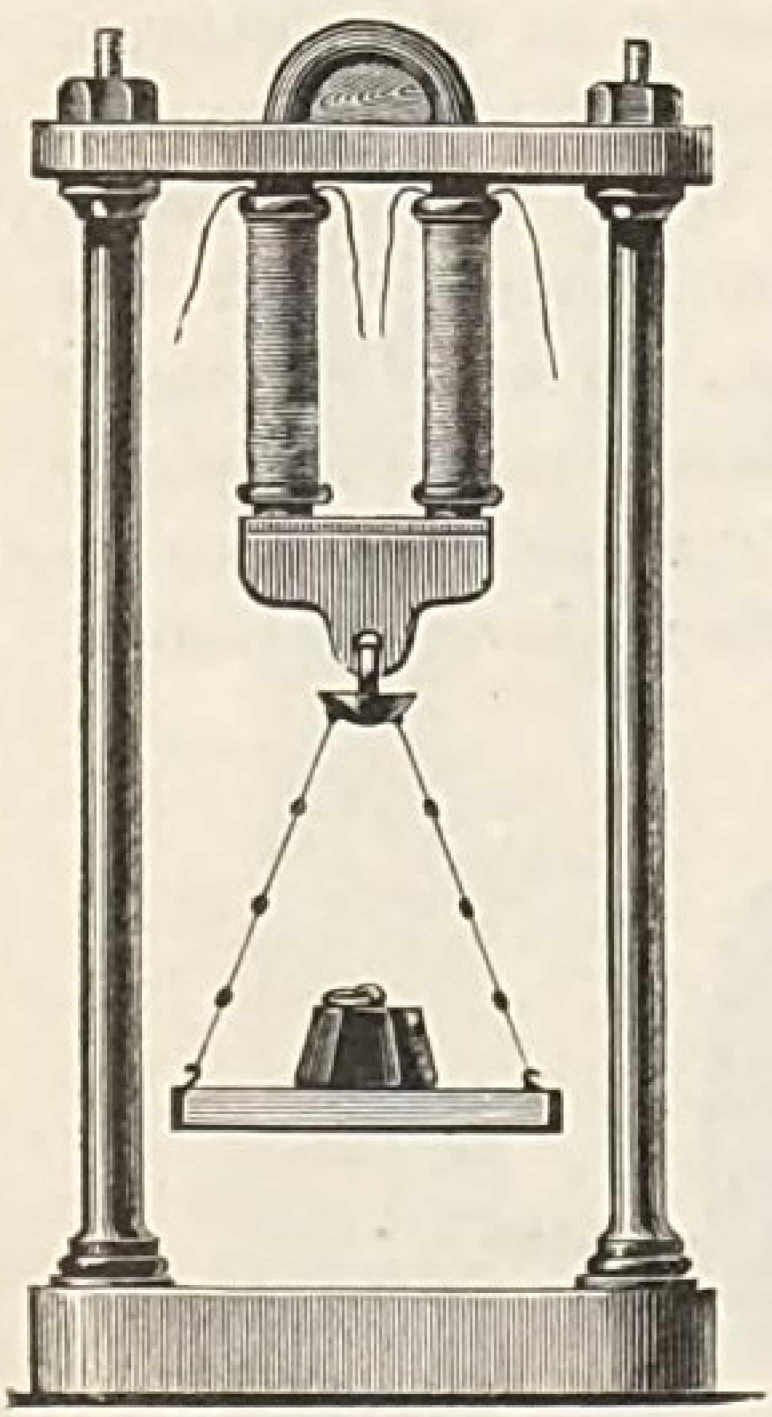


Fig. 520.

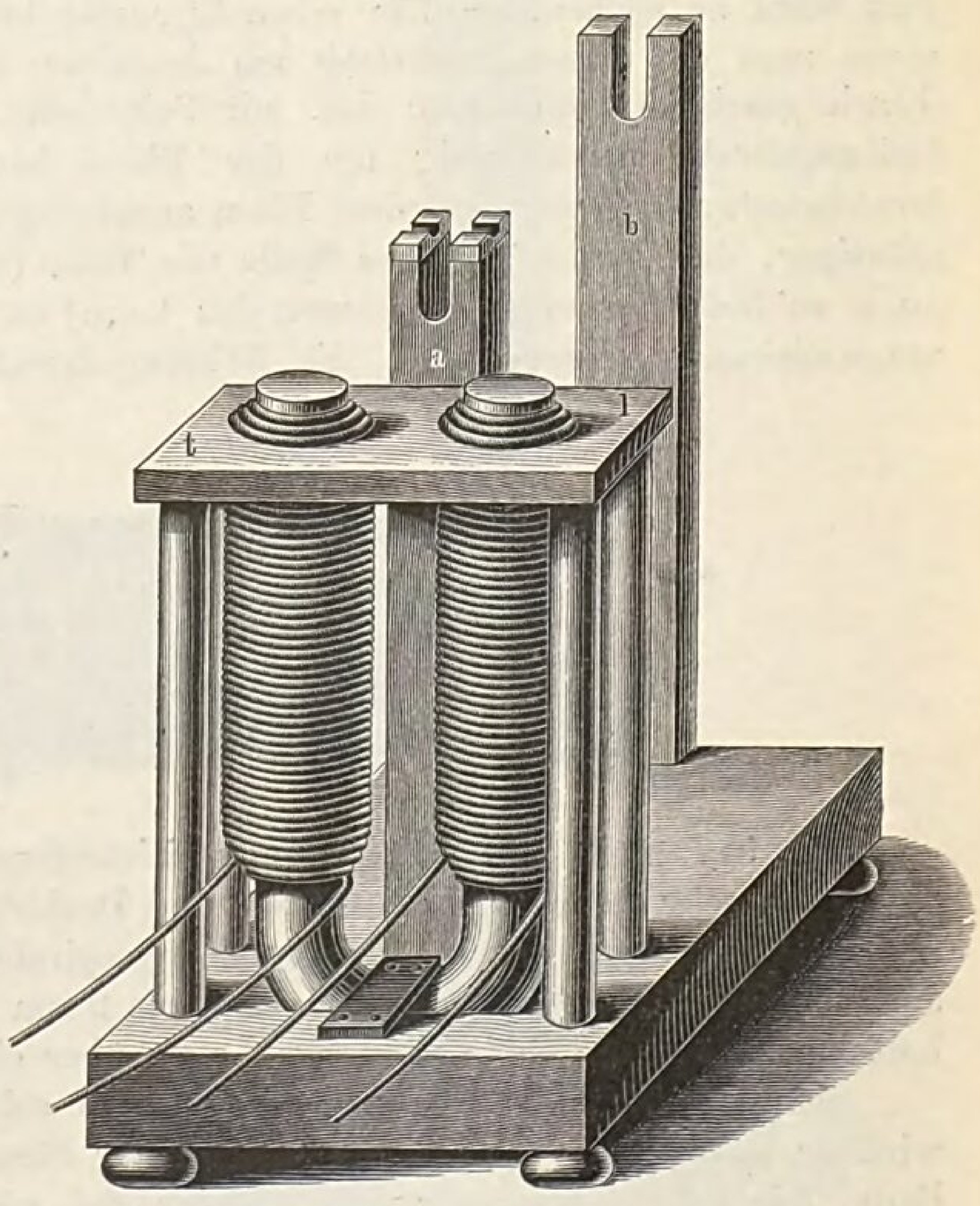
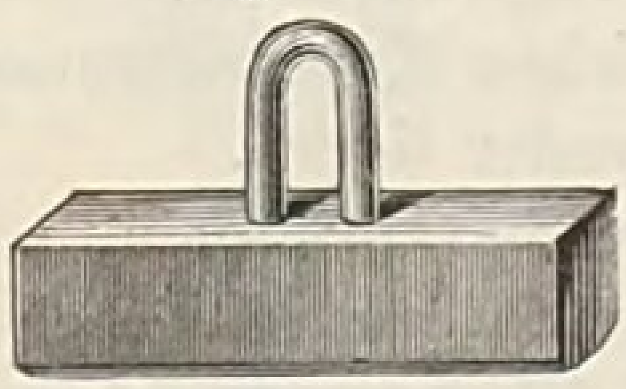


Fig. 521.



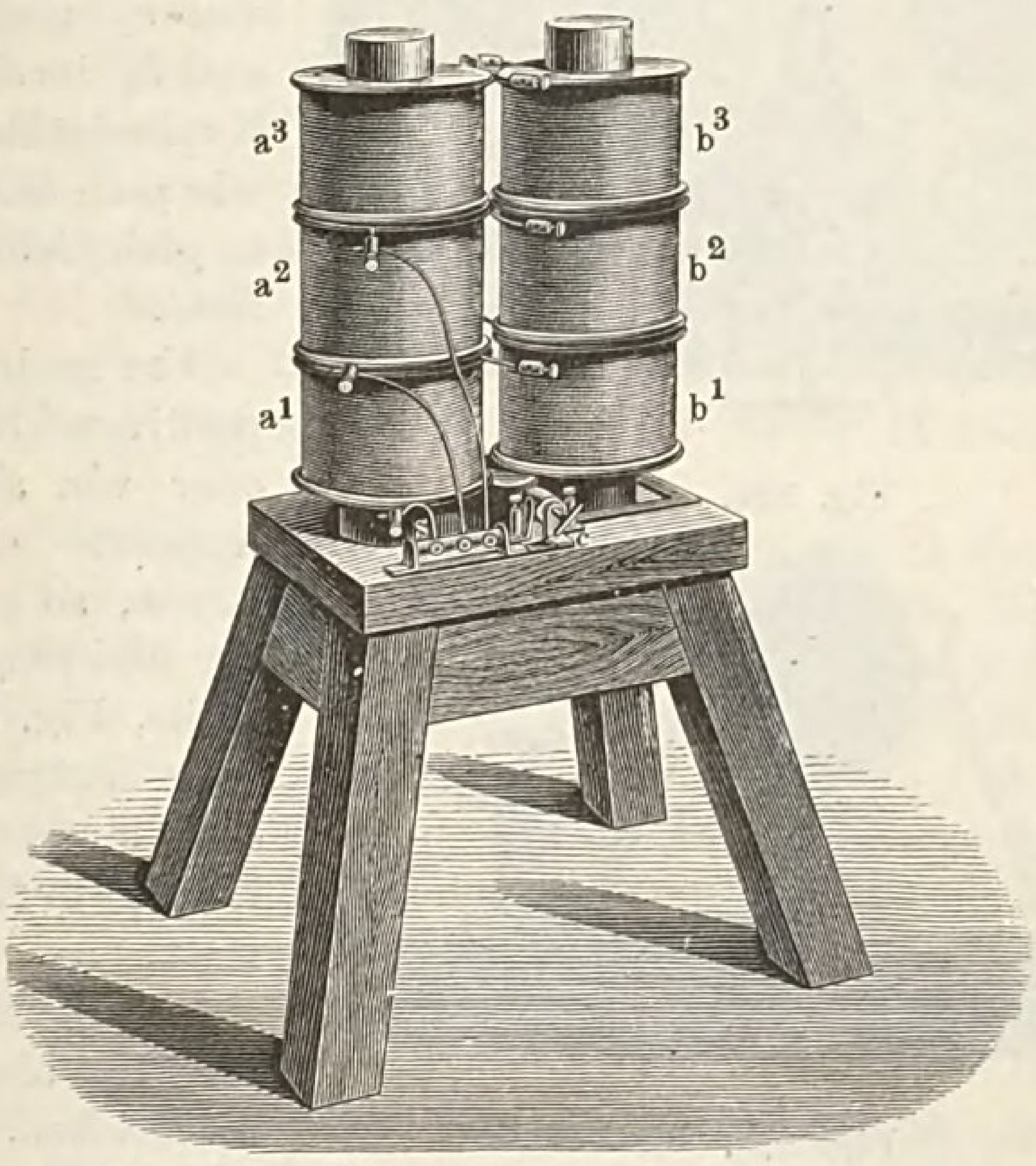
wendet man am besten kleinere Eisen an. Fig. 519 stellt eine zweckmässige Aufstellungsart kleinerer U-förmiger Elektromagnete in ungefähr $1/_{10}$ der natürlichen Grösse dar.

Ein solcher Elektromagnet von 1 cm Durchmesser erlangt eine Tragkraft von 10 kg, wenn auf jeden Schenkel eine Spirale von ungefähr 250 Windungen aufgeschoben ist und durch diese ein Strom geht, dessen Stärke = 1,7 Amp. ist.

Für manche Versuche, namentlich für die diamagnetischen, die wir weiter unten werden kennen lernen, ist es wünschenswerth, dass die beiden Pole des Elektromagnets nach oben gerichtet sind. Eine für diesen Zweck geeignete Aufstellung des Elektromagnets ist Fig. 520 ungefähr in $^1/_5$ der natürlichen Grösse dargestellt.

Um die Tragkraft dieses Elektromagnets zu prüfen, setzt man auf die Pole einen Anker von der Form Fig. 521; in das Oehr desselben wird ein eiserner Hebel eingesetzt, dessen Schneide auf der Säule *a* ruht; am anderen Ende des Hebels werden entsprechende Gewichte angehängt.

Fig. 522.



Die Säule *b* dient, um den Hebel aufzufangen, wenn der Anker abgerissen wird.

Fig. 522 stellt einen noch grösseren, vollständig ausgerüsteten Elektromagneten dar. Die beiden Schenkel sind durch eiserne Cylinder von 40 cm Länge und 5 cm Durchmesser gebildet, welche auf einer sie verbindenden Eisenplatte von 4 cm Dicke befestigt sind.

Auf jeden der Eisenkerne sind drei Spulen aufgeschoben, deren jede 330 Windungen (11 Lagen von 30 Windungen) 3 mm dicken, mit Wolle übersponnenen Kupferdrahtes trägt. Jedes Drahtende einer solchen Spule ist mit einer Klemmschraube versehen, so dass verschiedene Combinationen der Drahtspiralen möglich sind. Wenn man eine Säule von sechs grossen Zinkkohlenbechern als Stromquelle anwendet, ist die folgende Verbindungsweise die vortheilhafteste: die Klemmschrauben der inneren Drahtenden der Spiralen a_1, a_2 und a_3 sind durch kurze dicke

Drähte mit dem Messingstäbchen s, und in gleicher Weise die Klemmschrauben der inneren Drahtenden von b_1, b_2 und b_3 mit einem ähnlichen Messingstäbchen s' verbunden, welches auf der Rückseite des Apparates angebracht ist, wie man in dem Grundriss, Fig. 523, ersieht. Alsdann sind die äusseren Drahtenden von a_1 und b_1, von a_2 und b_2, von a_3 und b_3 durch kurze dicke Kupferdrähte verbunden, wie man dies für a_3 und b_3 gleichfalls in Fig. 523 sieht.

Fig. 523.

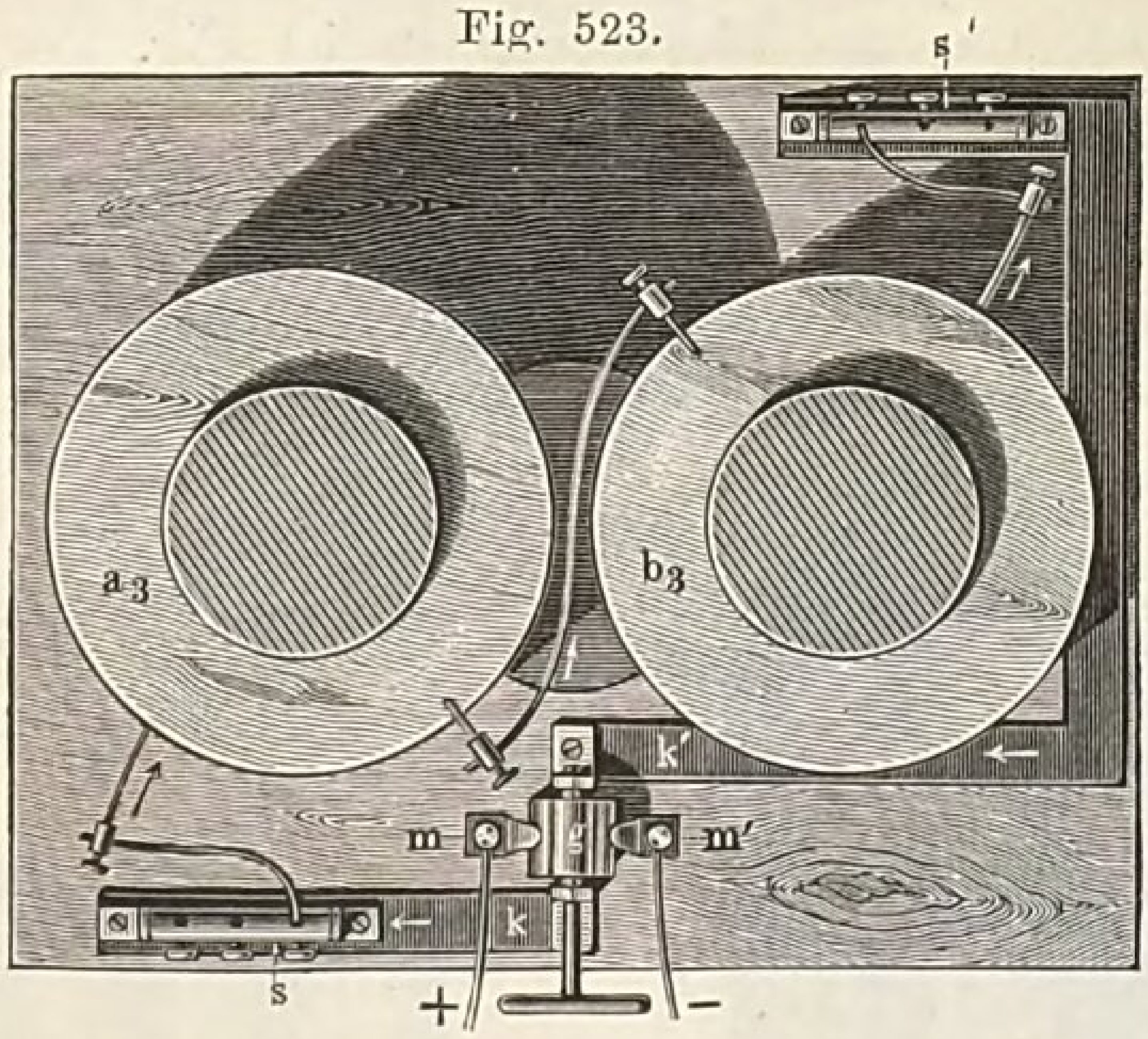


Fig. 524.

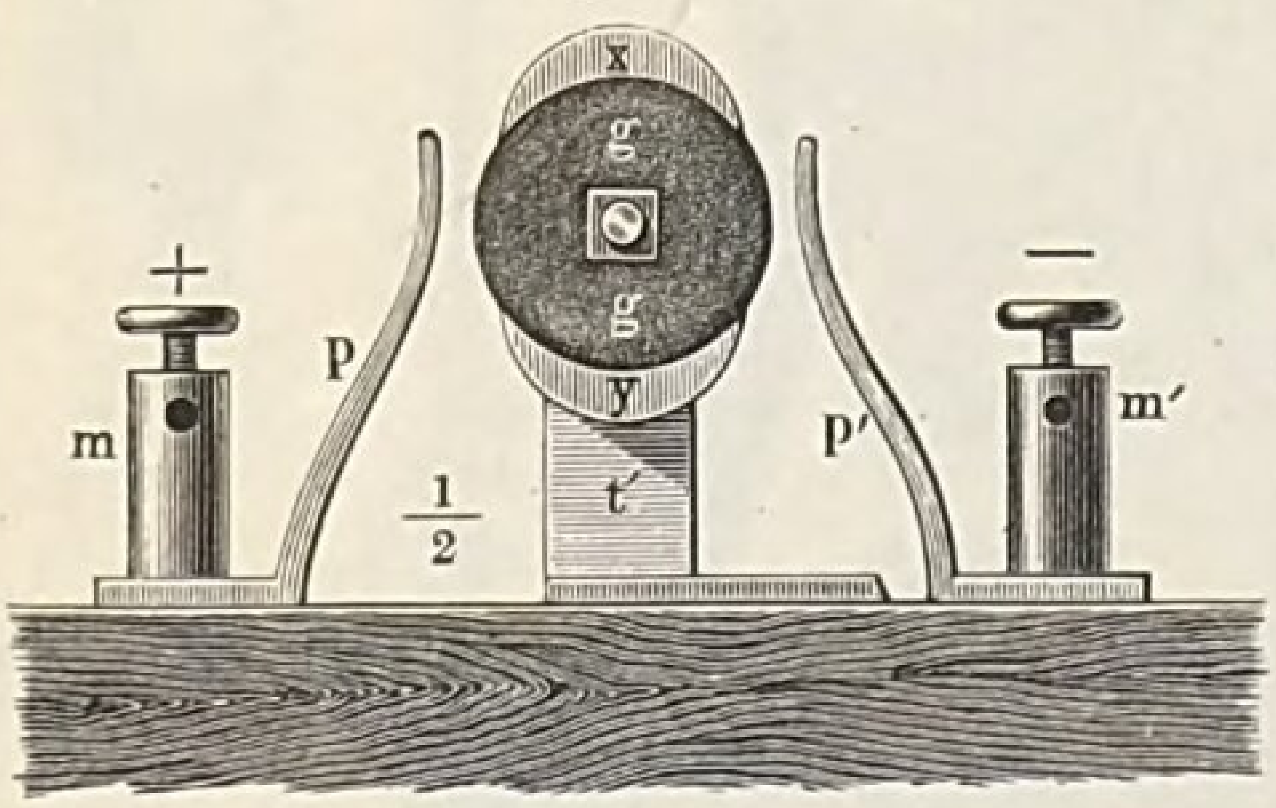
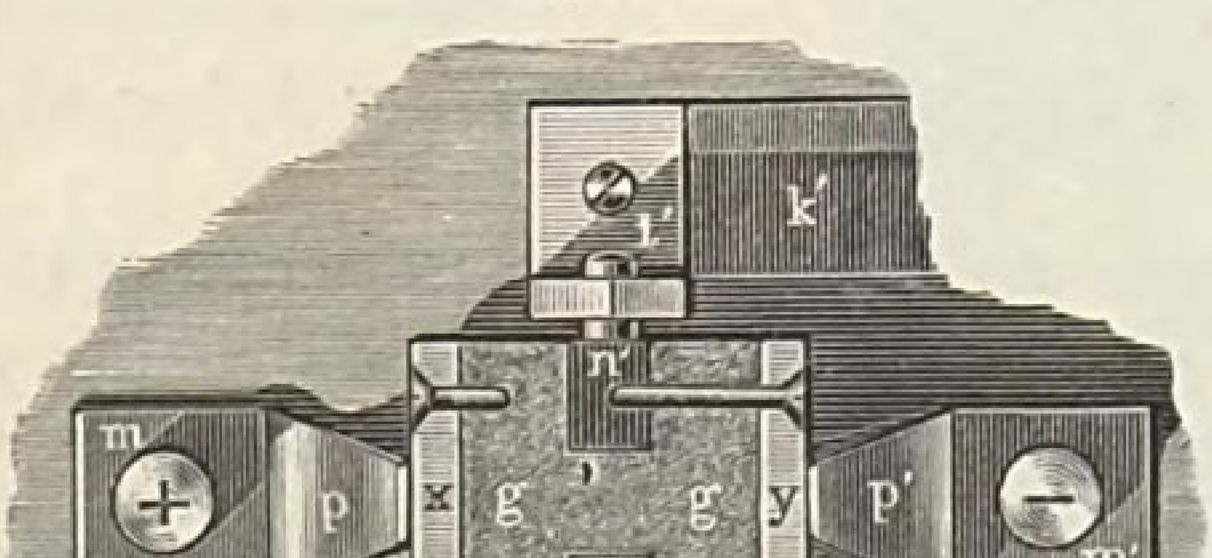


Fig. 525.



Um nach Belieben den positiven Strom von s oder von s' aus in den Apparat eintreten zu lassen, so dass er ihn in der Richtung der kleinen Pfeile, Fig. 523, oder in der entgegengesetzten durchläuft, dient ein Ruhmkorff'scher Commutator. Wir haben einen solchen schon in §. 118 abgebildet und beschrieben. Der hier (Fig. 523, 524 und 525) abgebildete ist ein wenig abweichend gebaut.

Der positive Pol der Volta'schen Säule, deren Strom die Windungen des Elektromagnets durchlaufen soll, ist in dem Messingsäulchen m, der negative Pol ist in m' eingeschraubt. Jedes dieser Messingsäulchen sitzt auf einer Kupferplatte fest. Die eine dieser Kupferplatten endet mit der kupfernen Feder p, die andere mit der Feder p'. Zwischen diesen Federn ist nun um eine horizontale Axe drehbar ein kurzer Cylin-

der g, von hartem Holz, gehärtetem Kautschuk oder einer anderen harten isolirenden Substanz, angebracht. Die Axe, um welche sich der Cylinder g dreht, wird durch zwei Eisenstäbe gebildet, welche von entgegengesetzter Seite her in die Masse von g eingelassen sind, ohne mit einander in Berührung zu treten. Die nach vorn aus g hervorragende eiserne Axe steckt in dem verticalen Theile des rechtwinklig gebogenen Messingstückes t, während der horizontale Theil desselben auf einem Kupferstreifen k aufgeschraubt ist, welcher weiter links das Messingstäbchen s trägt. In gleicher Weise steckt die nach hinten aus g vorragende eiserne Axe in dem Messingstück t', welches auf den Kupferstreifen k' aufgeschraubt ist.

Auf der isolirenden Walze g sind nun ferner diametral gegenüberstehend die kupfernen Wülste x und y befestigt, und zwar jeder durch zwei metallene Schrauben, von denen die eine kurz ist und nur in die isolirende Masse von g eindringt, während die andere bis in die eiserne Axe reicht. Auf diese Weise ist der Wulst x stets mit dem Eisenstücke n, mit dem Messingstücke t, mit k und s in leitender Verbindung, während andererseits der Wulst y stets mit n', t', k' und s' in leitender Verbindung steht.

Hat also die Commutatorwalze die Stellung, wie in Fig. 525, so tritt der positive Strom von p über x, n, t, k und s in die Windungen des Elektromagnets ein; wird dagegen der Commutator um 180^0 gedreht, so dass der Wulst x mit der Feder p', y aber mit p in Berührung kommt, so circulirt der Strom in entgegengesetzter Richtung.

Stellt man die Commutatorwalze so, dass die Verbindungslinie der beiden Kupferwülste vertical steht, wie man Fig. 524 sieht, so sind die Federn p und p' nicht in Berührung mit den Kupferwülsten x und y, der Strom ist also unterbrochen.

Magnetisirung von Stahlstäben durch den Strom. 176

Ebenso wie man durch den galvanischen Strom im weichen Eisen einen vorübergehenden kräftigen Magnetismus erzeugen kann, ist man auch im Stande, mit Hülfe desselben permanente Stahlmagnete von grosser Stärke hervorzubringen. Elias wandte zu diesem Zwecke zuerst eine nur 2,5 cm hohe Drahtspirale an, welche aus einem ungefähr 7 m langen, 2 bis 3 mm dicken, wohl übersponnenen Kupferdraht gebildet war und 4 cm inneren Durchmesser hatte.

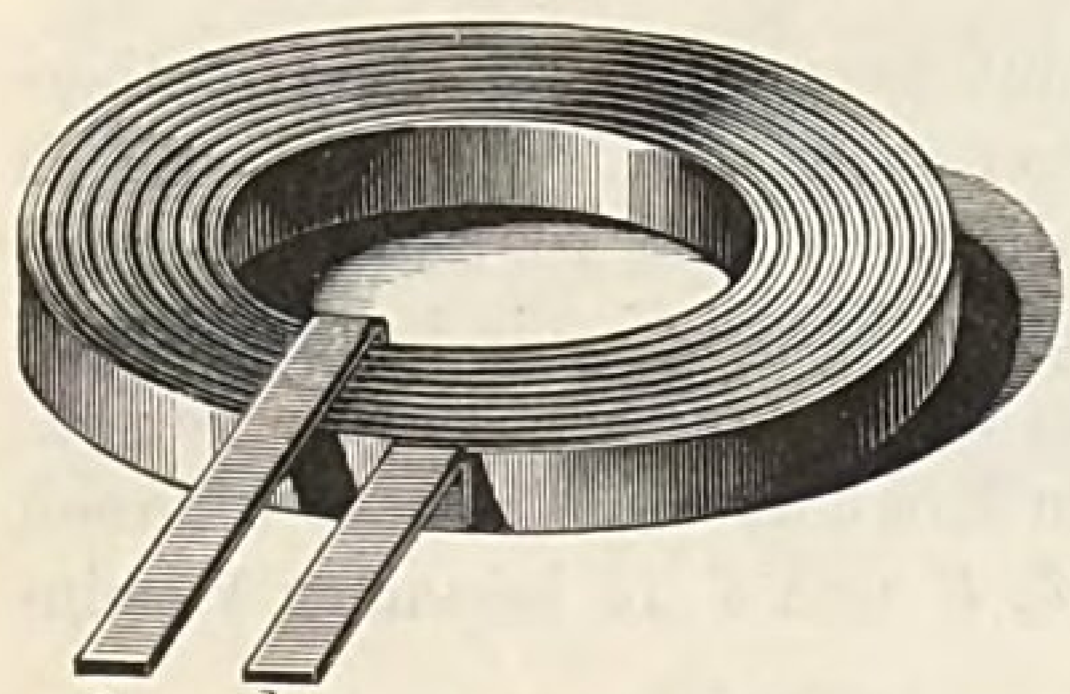
Während ein kräftiger Strom in den Drahtwindungen circulirt, steckt man den zu magnetisirenden Stahlstab in die Rolle und bewegt ihn bis an die Enden einige Mal hin und her, und wenn er sich wieder mit seinem mittleren Theile in der Rolle befindet, wird die Kette geöffnet und dann der Stab magnetisirt herausgenommen.

Es ist gut, den Stahlstab oben und unten mit einem Stück weichen Eisens oder, wenn der zu magnetisirende Stab hufeisenförmig gebogen ist, ihn während der Operation mit einem Anker zu versehen.

Statt einer Drahtspirale kann man auch eine **Bandspirale** anwenden, deren Einrichtung durch Fig. 526 erläutert wird. Eine solche Spirale ist auch noch zu vielen anderen Versuchen brauchbar, von welchen später die Rede sein wird.

Solche Bandspiralen werden dadurch hergestellt, dass man einen langen Streifen von Kupferblech, welcher ungefähr $1^1/_2$ bis 2 cm breit ist, gleichzeitig mit einem wollenen oder seidenen Bande aufwindet, welches etwas breiter ist als der Blechstreifen, und welches zur Isolirung einer jeden Blechlage von der folgenden dient.

Fig. 526.



Das rechtwinklig umgebogene Ende des Zuleitungsstreifens *b* ist an das äussere Ende der Blechwindungen angelöthet, und in gleicher Weise ist der Zuleitungsstreifen *a* mit dem inneren Ende der Windungen in Verbindung gebracht. Der grösseren Festigkeit wegen wird die ganze Spirale noch mit wollenem oder seidenem Bande umwickelt, so dass die einzelnen Windungen nicht mehr sichtbar sind. In unserer Zeichnung, in welcher überdies die Dicke des Blechs der Deutlichkeit wegen viel zu stark aufgetragen ist, fehlt diese Bandumwickelung.

Frick hat gezeigt, dass man mit Hülfe eines Elektromagnets, etwa eines solchen, wie der Fig. 522 abgebildete, weit kräftiger magnetisiren kann, als mit der Elias'schen Spirale, wenn man nicht sehr starke Ströme anwendet. Namentlich zeigt der Elektromagnet eine grosse Ueberlegenheit beim Magnetisiren sehr harter und dicker Stahlstäbe, für welche er in der That das geeignetste Magnetisirungsmittel sein dürfte. Das Verfahren ist sehr einfach: Man streicht, in der Mitte anfangend, mit der einen Hälfte des zu magnetisirenden Stabes oder Hufeisens 10- bis 20mal über den Nordpol, mit der anderen Hälfte eben so oft über den Südpol des Elektromagnets.

Natürlich wird die Hälfte der Stahllamelle der Nordpol, welche auf dem Südpol des Elektromagnets gestrichen wurde.

Durch die enorme magnetisirende Kraft der Elektromagnete ist es möglich geworden, die Coërcitivkraft der härtesten Stahllamellen zu überwinden, und dadurch sind die künstlichen in §. 5 besprochenen Magnetisirungsmethoden ziemlich überflüssig geworden.

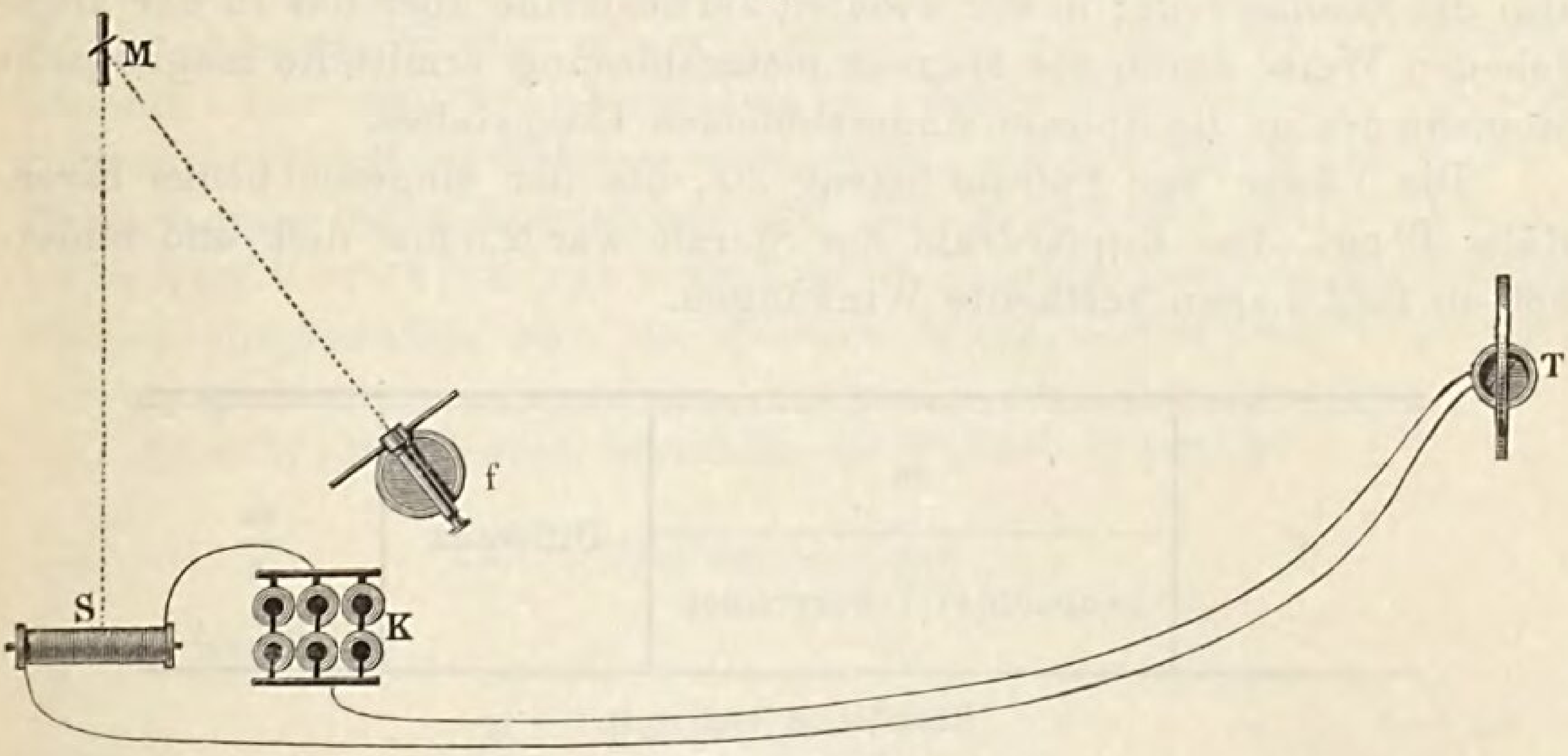
177 **Gesetze des Elektromagnetismus.** Die magnetisirende Kraft einer Drahtspirale, wie wir sie oben kennen gelernt haben, hängt offenbar ab von der Anzahl ihrer Drahtwindungen und von der Stärke des Stromes, welcher dieselben durchläuft; wir wollen deshalb geradezu das Product, welches man erhält, wenn man die Stromstärke mit der Win-

dungszahl multiplicirt, die magnetisirende Kraft der Spirale nennen.

Lenz und Jacobi haben durch Versuche bewiesen, dass die Weite der Windungen bei gleicher Stromstärke ohne Einfluss auf die Stärke des erzielten Magnetismus in Eisenstäben ist, vorausgesetzt, dass die Enden des Eisenstabes weit genug auf beiden Seiten aus der Spirale hervorragen. Nur wenn das Eisen nicht aus den Windungen hervorragt, ist die Wirkung der engen Windungen etwas stärker als die der weiten.

Dieselben Gelehrten haben gefunden, dass der Magnetismus eines Eisenstabes, welcher in einer Magnetisirungsspirale steckt, in demselben Verhältniss wächst, wie der Strom, welcher die Spirale durchläuft. Sie wandten bei ihren Versuchen ziemlich dicke Stäbe und verhältnissmässig schwache Ströme an. Für dünnere Stäbe aber und stärkere Ströme

Fig. 527.



findet die Proportionalität zwischen Stromstärke und Magnetismus nicht mehr statt; dies hat zuerst Joule bei einigen Versuchen über magnetische Anziehung beobachtet und J. Müller durch eingehende Untersuchungen nachgewiesen.

Die Anordnung derselben ist aus Fig. 527 zu ersehen. Der Strom einer, bald aus mehr, bald aus weniger Zinkkohlenbechern zusammengesetzten Säule *K* ging zunächst durch die Magnetisirungsspirale *S* und dann durch eine ungefähr 30 m weit von *S* entfernte Tangentenbussole *T*. Die Stromstärke war durch die an der Tangentenbussole hervorgebrachte Ablenkung bestimmt; die Stärke des Magnetismus, welcher in einem in die Spirale *S* eingeschobenen Eisenstab erregt wird, wurde durch die Ablenkung des Magnetometers *M* gemessen.

Die Magnetisirungsspirale war im magnetischen Meridian des Magnetometers *M* aufgestellt, und zwar so, dass ihre Axe rechtwinklig auf dem magnetischen Meridian stand. Die Länge des von dem Drehpunkte des Magnetometers auf die Axe der Spirale gefällten Perpendikels be-

trug 217 cm. Die Scala, deren Spiegelbild durch das Fernrohr *f* beobachtet wurde, war 208 cm weit von der Drehungsaxe des Magnetometers entfernt.

Die Stromstärke *s* wurde bei den folgenden Versuchen gemessen durch die trigonometrische Tangente des Winkels, um welchen die Nadel der Tangentenbussole durch den Strom abgelenkt wurde. Derselbe Strom brachte, durch die Spirale *S* gehend, an dem Magnetometer *M* eine Ablenkung von *n* Theilstrichen der Scala hervor; wurde dann bei unveränderter Stromstärke ein Eisenstab in die Spirale eingeschoben, so stieg die Ablenkung des Magnetometers auf *v* Theilstriche, das magnetische Moment *m* des eingeschobenen Eisenstabes ist also proportional mit $v - n$.

Nach diesen Bemerkungen wird die folgende Tabelle verständlich sein. Sie enthält in der ersten Verticalreihe unter *s* die trigonometrische Tangente der an der Tangentenbussole beobachteten Ablenkung, also die Stromstärke; in der zweiten Verticalreihe aber das in der angegebenen Weise durch die Magnetometerablesung ermittelte magnetische Moment des in die Spirale eingeschobenen Eisenstabes.

Die Länge der Spirale betrug 30, die der eingeschobenen Eisenstäbe 33 cm. Der Kupferdraht der Spirale war 2,8 mm dick und bildete 380 in fünf Lagen vertheilte Windungen.

s	*m*		Differenz	$\frac{m}{s}$
	beobachtet	berechnet		
Stabdicke 44,5 mm.				
0,785	20,41	20,06	— 0,35	25,6
0,344	8,80	8,81	+ 0,01	25,6
0,129	3,41	3,31	— 0,10	26,4
Stabdicke 15 mm.				
0,611	8,38	8,09	— 0,29	13,7
0,414	5,95	5,83	— 0,12	14,3
0,126	1,81	1,87	+ 0,06	15,0
Stabdicke 6 mm.				
0,871	2,56	2,91	+ 0,35	2,94
0,567	2,29	2,61	+ 0,32	4,04
0,382	2,45	2,27	+ 0,12	5,62
0,213	1,78	1,64	— 0,14	8,35
0,124	1,14	1,08	— 0,06	9,19

J. Müller hat das Verhältniss zwischen Stromstärke s und dem temporären Magnetismus m des Eisenstabes in der Magnetisirungsspirale durch eine Formel ausgedrückt, welche sich allen von ihm angestellten Beobachtungsreihen anschliesst. Diese Formel lautet

$$s = A d^{3/2} \, tang \, \frac{m}{B d^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 1$$

wenn man mit d den Durchmesser des Eisenstabes, mit A und B aber constante Factoren bezeichnet, welche sich mit der Länge der Spiralen ändern. Für die Spirale, auf welche sich obige Tabelle bezieht, ist $A = 0{,}016$ und $B = 0{,}00108$. Nach der Gleichung

$$s = 0{,}016 \, d^{3/2} \, tang \, \frac{m}{0{,}00108 \, d^2} \quad \ldots\ldots\ldots 2)$$

sind nun für die in der ersten Columne stehenden Werthe von s die zugehörigen Werthe von m berechnet und die Resultate erhalten worden, wie sie in der dritten Verticalreihe obiger Tabelle aufgeführt sind. Die so berechneten Werthe von m stimmen so gut mit den beobachteten überein, dass man wohl berechtigt ist, obige Gleichung für den empirischen Ausdruck des Gesetzes anzunehmen, nach welchem der temporäre Magnetismus eines Eisenstabes von der Stromstärke unter den gegebenen Verhältnissen abhängt, d. h. wenn der Eisenstab in eine Spirale eingeschoben ist, aus welcher er auf beiden Seiten genügend hervorragt.

A. v. Waltenhofen wandelte die Formel 1) um in

$$m = B d^2 \, arc \, tg \, \frac{s}{A \, d^{3/2}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 3)$$

und weiterhin in

$$y = \beta \gamma \, arc \, tg \, \frac{x}{\alpha \gamma^{3/4}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 4)$$

indem er anstatt des Stabdurchmessers die leichter genau bestimmbare Stabmasse γ und anstatt der Grössen m und s die magnetischen Momente y und x des Stabes und der Spirale einführte. α und β sind Constante.

1. Für $s = \infty$ ist $\frac{m}{B \, d^2} = 90^0$, also $m = 90 \, . \, B d^2$; für eine unendliche Stromstärke würde demnach der Stabmagnetismus doch nur einen endlichen Werth erhalten; es giebt also für jeden Eisenstab ein absolutes Maximum des Magnetismus, und dieses magnetische Maximum ist dem Quadrate des Durchmessers, also dem Querschnitte des Stabes, proportional.

A. v. Waltenhofen hat ferner gezeigt, dass man sowohl aus theoretischen Gründen, als auch nach allen bisher vorliegenden Versuchen den Coëfficienten β in der Formel 4) als eine Constante betrachten müsse, die für alle Elektromagnete denselben Werth hat. Hieraus folgt, dass

auch der Werth, welchen $\frac{y}{\gamma}$ für $x = \infty$ annimmt, nämlich $\frac{y}{\gamma} = 90\ \beta$, für alle Elektromagnete derselbe sein müsse. Dieses magnetische Maximum der Masseneinheit des Eisens beträgt in runder Zahl nahezu 200 Einheiten des C. Gr. S.-Systems per Gramm (2000 Gauss'sche Einheiten für jedes Milligramm), wobei zugleich ersichtlich ist, dass jedem Elektromagnet ein seinem Gewichte proportionaler Grenzwerth der Magnetisirung entspricht.

2. So lange $\frac{m}{0{,}00108\,d^2}$ nur einem kleinen Winkelwerthe entspricht, sind s und m ziemlich nahe proportional, und man kann ohne merklichen Fehler

$$s = c\,.\,d^{3/2}\,\frac{m}{d^2}$$

setzen, wo c einen leicht zu ermittelnden constanten Factor bezeichnet; daraus ergiebt sich aber

$$m = \frac{s\,.\,\sqrt{d}}{c};$$

so weit man also den Stabmagnetismus der Stromstärke proportional setzen kann, ist der durch gleiche Ströme in verschiedenen Eisenstäben erzeugte Magnetismus der Quadratwurzel aus dem Stabdurchmesser proportional.

Diese Folgerung aus der Müller'schen Formel ist auch durch Versuche von Dub und von Domalip bestätigt worden.

Dabei ist jedoch zu bemerken, dass die hier angeführte Proportionalität zwischen Stabmagnetismus und Stromstärke innerhalb viel weiterer Grenzen Geltung hat, als dies vermöge der Müller'schen Formel der Fall sein könnte, wie schon aus den Versuchen von Lenz und Jacobi, Buff und Zamminer und von Dub hervorgeht. Aus diesen letzteren, sowie aus seinen eigenen zur Prüfung der Müller'schen Formel unternommenen zahlreichen Versuchen hat A. v. Waltenhofen den Nachweis geliefert, dass die besagte Porportionalität erst aufhört, wenn der durch fortgesetzte Verstärkung des magnetisirenden Stromes vermehrte Stabmagnetismus schon beinahe bis zur Hälfte des magnetischen Maximums gesteigert worden ist. Von diesem Sättigungsgrade angefangen gilt eigentlich erst die Müller'sche Formel [1) bis 4)].

Eine kleine Abweichung von der Proportionalität zwischen Stabmagnetismus und Stromstärke — jedoch in einem der Müller'schen Formel entgegengesetzten Sinne — zeigt sich bei sehr geringen Sättigungsgraden, indem bei beginnender Magnetisirung der Magnetismus etwas rascher wächst als die Stromstärke.

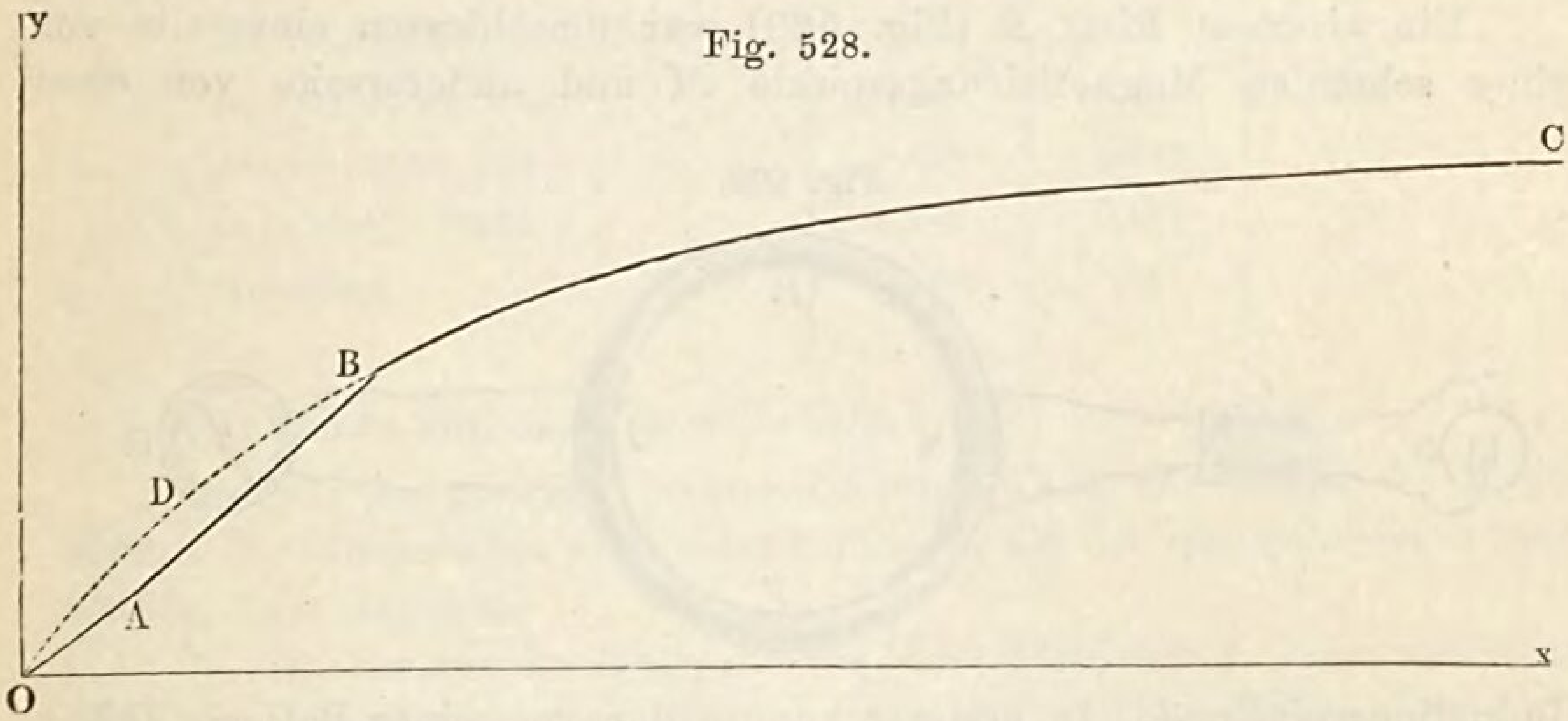
Diese schon von Lenz wahrgenommene Anomalie ist durch die Versuche von Dub, Wiedemann, Quintus Icilius und v. Walten-

hofen bereits vielfach bestätigt worden. Sie hat immer nur eine geringe Ausdehnung und ist bei dickeren Stäben weniger bemerkbar als bei dünneren.

Fasst man die soeben angeführten Gesetze kurz zusammen, so kann man sagen: Der Elektromagnetismus wächst anfangs etwas rascher als die magnetisirende Stromstärke, dann proportional mit derselben und bleibt hierauf, einem Maximum sich nähernd, immer weiter hinter derselben zurück.

Betrachtet man, um dieses Verhalten graphisch darzustellen, die magnetisirenden Stromstärken als Abscissen und die Momente des erregten Stabmagnetismus als Ordinaten, so erhält man für jeden Stab eine Curve ($O\ A\ B\ C$), welche (wie Fig. 528) anfangs gegen die Abscissenaxe convex ($O\ A$), dann merklich geradlinig ($A\ B$), weiterhin concav ($B\ C$) und endlich mit der Abscissenaxe parallel verläuft.

Fig. 528.



Der Müller'schen Formel würde eine durchaus concave Curve $O\ D\ B\ C$ entsprechen, dem Lenz-Jacobi'schen Proportionalitätsgesetze aber eine Gerade, nämlich $A\ B$ und deren Verlängerung über B hinaus.

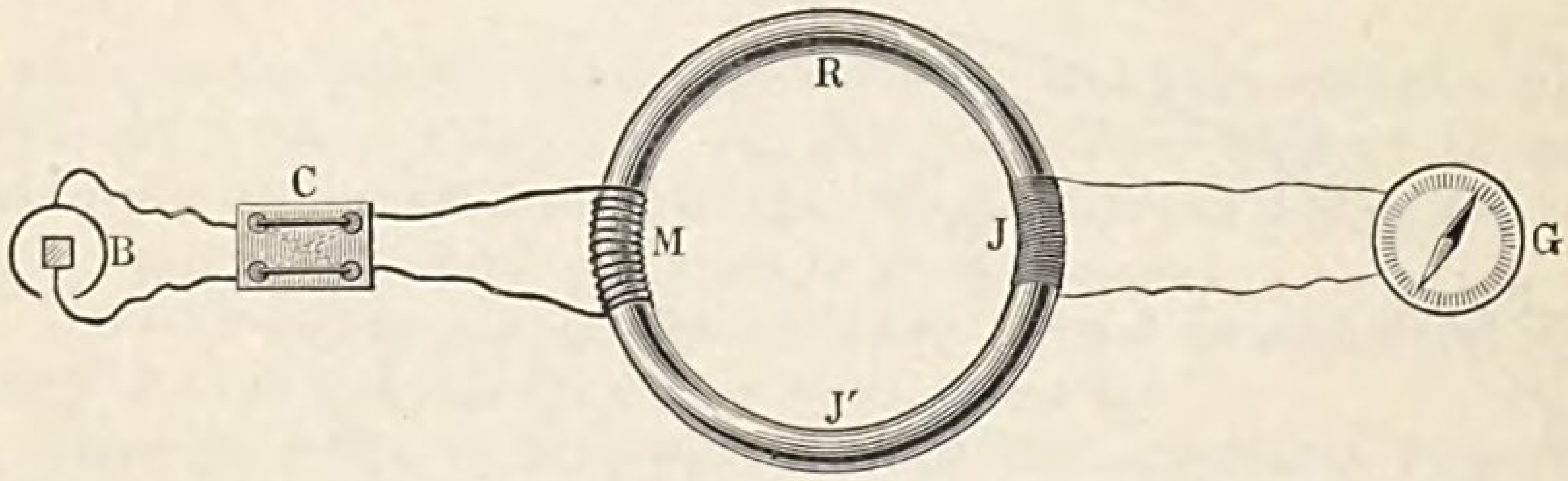
Die angeführten Thatsachen finden eine ungezwungene Erklärung durch die Theorie der drehbaren Molecularmagnete, deren Grundzüge wir in den §§. 9 und 10 gegeben haben. Hält man die daselbst entwickelten Vorstellungen fest, so ist klar, dass der in einem Eisenstücke hervorgerufene Magnetismus nicht bloss von der directen Einwirkung des magnetisirenden Stromes herrühren muss, sondern zum Theil auch durch die Wechselwirkung der magnetischen Molecüle unter sich herrühren kann. Ob diese letztere Wirkung überhaupt nachweisbar oder beträchtlich ist, kann allerdings nur auf Grundlage von Thatsachen beantwortet werden. Hierher gehören die Versuche, welche v. Waltenhofen mit pulverförmigem Eisen und A. Oberbeck mit einem ringförmigen Elektromagneten angestellt hat. Bei den ersteren hat sich gezeigt, dass pulverförmiges Eisen, in einer cylindrischen Glasröhre in

eine Magnetisirungspirale eingeführt, einen vielmal (5- bis 9 mal) geringeren Magnetismus annimmt, als bei gleicher Stromstärke in einer zusammenhängenden Eisenmasse von gleichem Gewichte der Fall sein würde. Bei schwächeren Strömen zeigt sich dies noch auffallender als bei stärkeren. v. Waltenhofen erklärt diese Erscheinung durch den Umstand, dass durch die Vertheilung des Eisens in kleine Partikel jene Wechselwirkung der längs der Axe des Cylinders benachbarten magnetischen Molecüle, welche in der cohärenten Masse die magnetisirende Wirkung des Stromes verstärkt, grösstentheils aufgehoben ist und gelangt zu dem Schlusse, dass das magnetische Moment, welches ein Eisenstab in einer Magnetisirungsspirale annimmt, sogar grösstentheils von der magnetischen Wechselwirkung seiner Molecüle herrührt.

Der Versuch von A. Oberbeck, dessen Verständniss die weiter unten zu lehrenden Inductionsgesetze voraussetzt, bestand in Folgendem:

Ein eiserner Ring R (Fig. 529) war umschlossen einerseits von einer schmalen Magnetisirungsspirale M und andererseits von einer

Fig. 529.



Inductionsspirale J. In ersterer konnte der von einer Batterie B herrührende Strom mittelst eines Commutators C umgekehrt werden. Der dadurch in der Inductionsspirale J inducirte Strom, an einem Galvanometer G gemessen, gestattete eine Vergleichung der magnetischen Erregung des Ringes an verschiedenen Stellen. Es zeigte sich nun, dass es einen verhältnissmässig geringen Unterschied machte, ob die Spirale J dicht neben der Spirale M, oder, wie in der Zeichnung, möglichst weit davon entfernt, oder endlich an einer beliebigen anderen Stelle J' sich befand. Die hierdurch constatirte, in allen Querschnitten des Ringes wenig verschiedene magnetische Erregung kann unmöglich von der directen Einwirkung des Stromes allein herrühren, sondern muss grösstentheils durch die besagte moleculare Wechselwirkung bedingt sein.

Man fasst dies gegenwärtig so auf, dass die durch den Strom innerhalb der Spirale M erzeugten Kraftlinien fast sämmtlich innerhalb des Eisenringes verlaufen und deshalb bei jeder Stellung der Spirale J eine nahe gleiche Inductionswirkung ausüben.

178 **Elektromagnetisches Verhalten des Stahles. Remanenter Magnetismus.** In ihrem Verhalten gegen den magnetisiren-

den Einfluss der durchströmten Spirale zeigen weiches Eisen und harter Stahl ganz ähnliche Verschiedenheiten, wie die, welche in §. 4 besprochen wurden. Dies erhellt schon aus einigen Versuchen, welche J. Müller mit ungleich harten (16,1 cm langen und 6 mm dicken) Eisen- und Stahlstäben angestellt hat und deren Ergebnisse die nachstehende Tabelle übersichtlich macht. In derselben bedeutet m den temporären (d. h. während der Einwirkung des magnetisirenden Stromes beobachteten) und r den sogenannten remanenten Magnetismus, nämlich denjenigen, mit welchem sich der untersuchte Stab nach der Unterbrechung des magnetisirenden Stromes noch behaftet zeigte.

	m	r	$\frac{r}{m}$
Schmiedeeisen	0,499	0	0
Ausgeglühter Stahl	0,437	0,061	0,14
Angelassener Stahl	0,437	0,123	0,28
Gehärteter Stahl	0,248	0,158	0,55
Gusseisen	0,246	0,017	0,06

Wir sehen nun aus dieser Tabelle:

1. dass bei gleicher magnetisirender Kraft der temporäre Magnetismus des Eisenstabes viel bedeutender ist als der des gehärteten Stahlstabes, dass dagegen

2. der remanente Magnetismus des Stahlstabes sehr bedeutend (55 Proc. des temporären), für den Stab aus weichem Eisen aber gleich Null ist.

Beziehungen zwischen Magnetismus und Stromstärke sind bei diesen Versuchen nicht ermittelt worden; v. Waltenhofen fand solche auch für den Stahl und zwar bei dünnen Stäben und bis zu nicht sehr starken Magnetisirungen entsprechend der Formel

$$y = C\partial^{3/2}x^{1/3},$$

wobei x die magnetisirende Stromstärke, y den Stabmagnetismus und ∂ den Stabdurchmesser bedeutet, während C nur von der Beschaffenheit der Stahlsorte abhängt und mit zunehmender Härte des Stahles abnimmt.

Bei stärkeren Magnetisirungen, wie sie jedoch nur bei weichen und dünnen Stahlstäben erreichbar sind, nähert sich auch der im Stahl erregte Magnetismus einem Grenzwerthe.

Als erreichbaren Grenzwerth des remanenten Magnetismus kann nach W. Weber bei den stärksten Stahlmagneten der Betrag von etwa 400 Gauss'schen Einheiten per Milligramm angenommen werden, was auf (C. Gr. S.)-System umgerechnet 40 Einheiten per Gramm beträgt. v. Waltenhofen magnetisirte glasharten Wolframstahl bis zu 47 und

Schneebeli englische Nähnadeln bis zu 85, dünne Stricknadeln sogar bis zu 106 solcher Einheiten. Man nennt das auf die Gewichtseinheit eines Stabes reducirte magnetische Moment den specifischen Magnetismus des Stabes. Bei gewöhnlichen Magnetstäben ist dasselbe meist viel kleiner als 40 (§. 44).

Bemerkenswerthe Eigenthümlichkeiten hinsichtlich der Coërcitivkraft sind am Magneteisenstein beobachtet worden. A. L. Holz verglich das elektromagnetische Verhalten dieses Minerals mit jenem des Stahles, indem er Stahlstücke von gleicher Form und Grösse wie die untersuchten Stücke von Magneteisenstein dem Versuche unterwarf. Er fand, dass der temporäre Magnetismus des Minerals kleiner ist als bei glashartem Stahl, dass aber nach dem Aufhören der magnetisirenden Kraft der letztere mehr Magnetismus verliert als ersteres. In der That ist der im Magneteisenstein auftretende remanente specifische Magnetismus der grösste aller bisher untersuchten magnetischen Körper. Diese Ueberlegenheit über den Stahl nimmt jedoch bei den stärksten Magnetisirungen wieder ab und nähert sich der Gleichheit.

Was den remanenten Magnetismus im Eisen betrifft, so ist bereits bemerkt worden, dass derselbe keineswegs immer = 0 ist, wie bei den oben S. 633 angeführten Versuchen von J. Müller. In der Regel beobachtet man auch in den weichsten Eisensorten einen magnetischen Rückstand, der freilich oft nur mit Hülfe von feineren Instrumenten nachweisbar ist.

Aus dem reichen Materiale von Thatsachen, welches die bisherigen Untersuchungen über den remanenten Magnetismus geliefert haben, mögen hier nur zwei Gesetze erwähnt werden, welche einerseits wegen ihrer Allgemeinheit und andererseits wegen ihres Zusammenhanges mit der Theorie der Molecularmagnete von Wichtigkeit sind.

1. Der remanente Magnetismus im weichen Eisen fällt, wie v. Waltenhofen zuerst beobachtet hat, auffallend grösser aus, wenn der magnetisirende Strom nicht, wie es gewöhnlich geschieht, plötzlich unterbrochen, sondern allmälig (durch Einschaltung von immer grösseren Widerständen) auf Null reducirt wird. Bei plötzlicher Stromunterbrechung hat v. Waltenhofen in dicken Stäben von sehr weichem Eisen manchmal sogar negative magnetische Rückstände („anomale Magnetisirung“) beobachtet. Die erstere Thatsache ist seither auch von Fromme u. A. vielfach bestätigt. Die anomale Magnetisirung tritt selten auf, ist aber von Ruths auch schon wiederholt beobachtet worden.

Beide Erscheinungen finden in der Theorie der Molecularmagnete eine ungezwungene Erklärung, wenn man annimmt, dass bei der Bewegung der Molecularmagnete neben der Tendenz, in die ursprünglichen Gleichgewichtslagen zurückzukehren, auch ein gewisser Reibungswiderstand stattfindet. Dieser letztere wird bei langsamem Nachlassen und Aufhören der magnetisirenden Kraft den völligen Rückgang der Molecüle hindern; beim plötzlichen Aufhören der magnetisirenden Kraft aber

werden die Molecüle, vermöge der grösseren, lebendigen Kraft ihrer rückgängigen Bewegung, ihren ursprünglichen Gleichgewichtslagen näher kommen oder dieselben sogar überschreiten und jenseits derselben zur Ruhe kommen.

2. Ein zweites hierher gehöriges Gesetz ist das folgende, von Ruths durch zahlreiche Versuche constatirte: Der remanente Magnetismus fällt desto grösser aus, je „gestreckter“ die Form des Elektromagneten ist, d. h. je kleiner z. B. bei einem cylindrischen Stabe der Durchmesser im Vergleiche mit der Länge ist. So erklärt sich z. B. auch der starke remanente Magnetismus von Blitzableitern, Fenstergittern etc. in Folge erdmagnetischer Einwirkung. Die theoretische Begründung dieses Gesetzes führt auch wieder auf die bereits erwähnte Wechselwirkung zurück, welche die magnetischen Molecüle in der Richtung der Axe des Stabes auf einander ausüben.

Beziehungen zwischen Torsion und Magnetismus. Es 179
ist seit Langem bekannt, dass mechanische Erschütterungen auf den Magnetismus von Stahlstäben, welche unter dem Einfluss magnetisirender Kräfte stehen, einen Einfluss ausüben. In ähnlicher Weise wie Erschütterungen wirkt auch, wie Matteucci sowohl wie auch Wertheim gezeigt haben, die Torsion der Stahlstäbe. Am gründlichsten hat G. Wiedemann*) die Beziehungen und Analogien zwischen Torsion und Magnetismus untersucht. Die wichtigsten der von ihm hierüber zusammengestellten Sätze sind folgende:

Torsion.	Magnetismus.
1. Erschütterungen während der Einwirkung des tordirenden Gewichtes vermehren die Torsion eines Drahtes.	1. Erschütterungen während der Einwirkung eines magnetisirenden Stromes vermehren den Magnetismus des Stahlstabes.
2. Die permanente Torsion eines Drahtes wird nach Wegnahme des tordirenden Gewichtes durch Erschütterungen vermindert.	2. Der permanente Magnetismus eines Stahlstabes wird nach der Unterbrechung des magnetisirenden Stromes durch Erschütterungen vermindert.
3. Die permanente Torsion der Eisendrähte nimmt durch ihre Magnetisirung ab.	3. Der permanente Magnetismus der Stahlstäbe nimmt durch ihre Torsion ab.
4. Wird ein Draht magnetisirt, während er unter dem Einfluss eines tordirenden Gewichts steht, so nimmt seine Torsion bei schwacher Magnetisirung zu, bei stärkerer nimmt sie wieder ab.	4. Wird ein Stahlstab tordirt, während er unter dem Einflusse eines magnetisirenden Stromes steht, so nimmt sein Magnetismus bei schwacher Torsion zu, bei stärkerer nimmt er wieder ab.

*) Lehre v. d. Elektricität III, 671.

5. Leitet man durch einen magnetisirten Eisendraht einen Strom oder magnetisirt man einen Eisendraht, durch den man einen Strom geleitet hat, so tordirt er sich.

5. Tordirt man einen Eisendraht während oder nach dem Durchleiten eines galvanischen Stromes, so wird er magnetisch.

180 **Töne beim Magnetisiren des Eisens.** Die Magnetisirung des Eisens durch eine galvanische Spirale ist oft von einer eigenthümlichen Tonbildung begleitet. Die erste hierher gehörige Beobachtung wurde von Page im Jahre 1837 gemacht. Nach ihm wurde das galvanische Tönen des Eisens von Marrian, de la Rive, Wertheim und Buff untersucht*).

Wenn man einen Eisenstab mit einer Drahtspirale umgiebt und durch diese einen starken elektrischen Strom leitet, so hört man bei jeder Schliessung oder Unterbrechung des Stromes ein kurzes Geräusch, welches mehr einem Geklirr als einem musikalischen Klange ähnlich ist.

Hat man jedoch zu diesem Versuche einen Stab von geringer Dicke gewählt, dessen eines Ende oder dessen Mitte in einen Steg eingespannt ist, welcher auf einem Resonanzboden aufsitzt, so wird neben dem knarrenden Klirrgeräusche ein Ton von bestimmter Höhe wahrgenommen.

Um ein rasch auf einander folgendes Oeffnen und Schliessen des Stromes zu bewirken, kann man irgend einen der später zu besprechenden Stromunterbrecher anwenden, und zwar am besten einen Quecksilberunterbrecher, der nicht selbst ein merkliches Geräusch macht. Wenn der Stromunterbrecher ein störendes Geräusch macht, so muss er in einem Nebenzimmer aufgestellt und durch eine Drahtleitung in den Schliessungsbogen eingeschaltet werden.

Schon Marrian beobachtete, dass der Ton, welchen die Eisenstäbe unter diesen Umständen hören lassen, der Longitudinalton derselben ist. Er ist unabhängig von der Geschwindigkeit, mit welcher die Unterbrechungen auf einander folgen.

Wertheim hat dies bestätigt. Er fand, dass bei gleicher Länge die Form und Grösse des Querschnittes keinen Einfluss auf die Höhe des Tones habe, dagegen hörte er bei vier Stäben von 2,0, 1,16, 1,333 und 1 m Länge nach einander den Grundton, die Terz, die Quint und die Octav.

Fig. 530 stellt den von Wertheim angewandten Apparat dar. Der Eisen- oder Stahlstab muss in der Höhlung der Magnetisirungsspirale stecken, ohne die Wände derselben zu berühren.

Bei dünneren Stahlstäben ist das Klirrgeräusch weniger stark, der Ton aber weit reiner und stärker, als bei eisernen Stäben von gleichen Dimensionen.

*) Ann. d. Chem. u. Pharm. III. Supplementband.

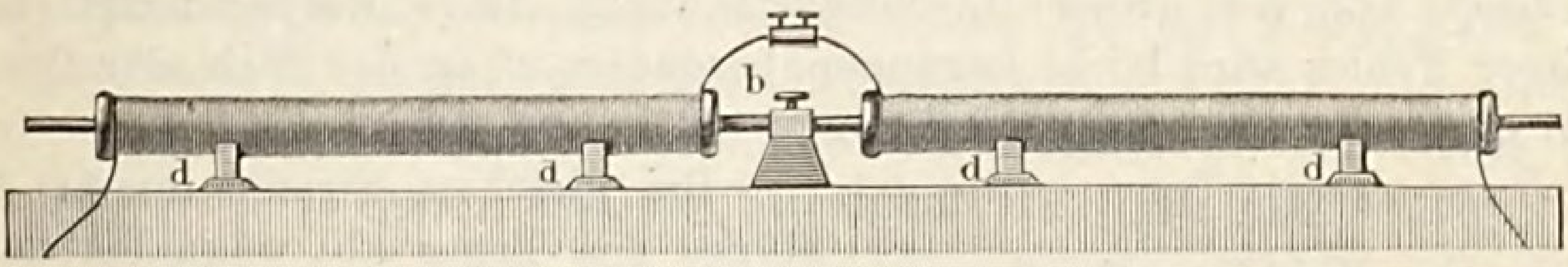
Es gelingt zwar nicht, den begleitenden Klirrton ganz zu beseitigen, doch fand Buff, dass er merklich zurücktritt, wenn man den Stab nicht seiner ganzen Länge nach mit Drahtwindungen umgiebt, sondern eine nur 10 bis 15 cm lange Rolle nahe an seinem freien Ende anbringt. Die besten Resultate erhielt er mit einem 126 cm langen, nur 5 mm dicken Stahlstab, welcher in der Mitte auf einem Resonanzboden eingespannt und nur auf 12 cm seiner Länge mit einer Drahtrolle umgeben war.

Stäbe von Zink, Kupfer, Messing, Glas etc. geben selbst mit Säulen von 20 Bunsen'schen Elementen keinen Ton.

Befindet sich der Stab ausserhalb der Axe der Spirale, so ist der longitudinale Ton weniger rein und von Querschwingungen begleitet, die schon dem blossen Auge sichtbar sind; allein diese Schwingungen geben einen so schwachen Transversalton, dass man ihn nicht anders hören kann, als wenn man das Ohr auf das den Apparat tragende Brett legt.

Der Ton bleibt sich gleich, es mag der Strom in gleichem oder entgegengesetztem Sinne die beiden Hälften des Stabes umkreisen, oder

Fig. 530.



endlich nur auf eine Hälfte oder irgend einen Theil des Stabes wirken, sobald nur dieser Theil hinlänglich vom Einspannungspunkte entfernt und der Strom hinlänglich stark ist.

Aehnliche Resultate wurden mit Eisen- und Stahldrähten erhalten, welche in der Axe der Magnetisirungsspirale ausgespannt waren. — Wertheim wandte Drähte von 0,5 bis 3 mm Dicke an. Sobald die Spannung so stark war, dass der am Draht herabgeführte Violinbogen nur den Längston ohne ein anderes Geräusch vernehmen liess, war der vom unterbrochenen Strom erregte Ton auch ganz rein; wenn aber die Spannung vermindert wird, ist sowohl der vom Violinbogen als auch der durch den Strom erzeugte Ton von einem anderen Geräusch begleitet. Dieses Geräusch ist nicht bloss der Querton, sondern ein ganz eigenthümliches, schwer bestimmbares Geräusch, gewissermaassen ein den Draht entlang laufendes Geklirr, welches vorzugsweise bei rasch auf einander folgenden Unterbrechungen merklich wird. Bei dünnen Drähten ist dieses Geräusch schwer zu beobachten, während der Längston selbst bei schwachen Spannungen andauert. — Wohl angelassene Drähte von 1 mm Durchmesser geben im Allgemeinen die besten Resultate.

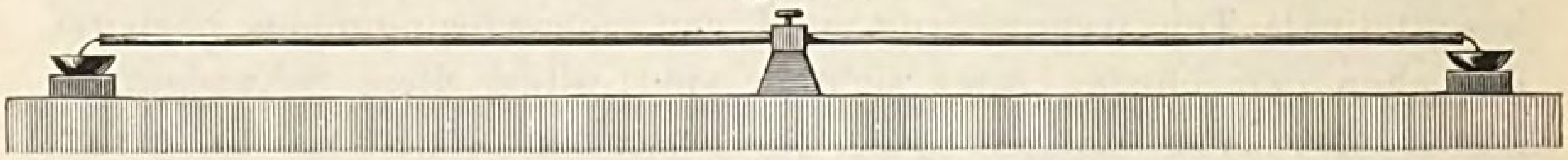
Drähte von Blei, Zinn, Zink, Kupfer, Messing, Silber und Platin geben, nach Wertheim's Versuchen, keinen Ton.

Wenn die Unterbrechungen des elektrischen Stromes sehr rasch auf einander folgen, so wird dadurch die Höhe des eben besprochenen

magnetischen Tones zwar nicht geändert, aber es tritt dann gleichzeitig noch ein anderer Ton auf, welcher von der Summe der gegen die Eisenatome ausgeübten magnetischen Stösse abhängig ist und gleiche Höhe mit demjenigen hat, welchen der Unterbrechungsapparat selbst bietet.

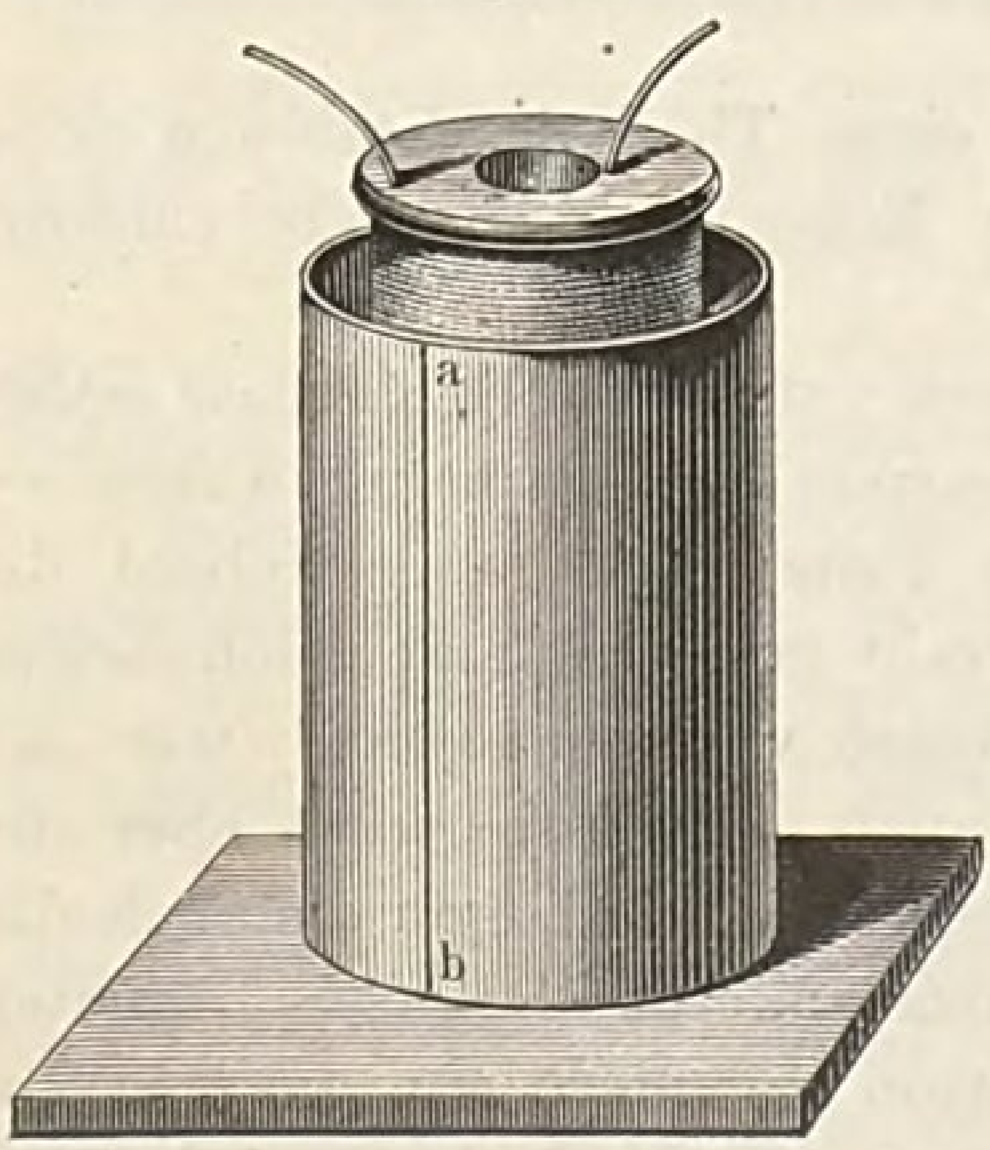
Auch mit dem durchgeleiteten Strom brachte Wertheim Töne hervor. Um sie in einem Eisenstab zu erzeugen, befestigte er einen dünnen Messinghaken an jedem Ende des Stabes, Fig. 531, und tauchte dieselben in Quersilbernäpfchen.

Fig. 531.



Jedesmal, wenn der Strom hergestellt und wieder unterbrochen wird, hört man den Längston. „Bei diesen Versuchen muss man sich aber sehr hüten", sagt Wertheim, „den eigenen Ton des Stabes zu verwechseln mit dem Geräusch des Funkens, welches sich gleich jedem anderen Ton mit grosser Leichtigkeit durch starre Körper fortpflanzt. Dieser Fehler wird leicht begangen, besonders wenn der Stab oder Draht auf einem Resonanzboden befestigt ist."

Fig. 532.



Bei gleichem Strome nimmt die Stärke des Tones ab, wenn der Stab dicker ist.

Nach Wertheim's Untersuchungen erfährt der Eisenstab im Momente der Magnetisirung eine sehr kleine Verlängerung, welche ohne Zweifel die Ursache der Tonbildung ist. Diese Verlängerung ging selten über 0,002 mm, und war, obwohl deutlich sichtbar, doch fast unmessbar.

Nach Joule's Messungen beträgt die Verlängerung eines bis zur Sättigung magnetisirten Eisenstabes $^1/_{270000}$ seiner Länge.

Ein ähnliches Tönen beobachtete Poggendorff*), als er eine kräftige Magnetisirungsspirale (die seinige war aus einem ungefähr 30 m langen und $1^1/_2$ mm dicken Kupferdraht gebildet) mit einem Cylinder von Eisenblech umgab. Die Axe der Drahtspirale stand vertical und der Blechcylinder war darüber geschoben, ungefähr wie Fig. 532 zeigt.

Zur Unterbrechung des Stromes wurde ein Wagner'scher Hammer

*) Annal. XCVIII.

von möglichst leisem Gang angewandt, dessen Beschreibung weiter unten folgt.

Das Tönen des Eisencylinders erfolgt, mag nun der Cylinder vollkommen metallisch geschlossen sein oder nicht; in letzterem Falle wird aber der Ton sogleich weit kräftiger, oder vielmehr es scheint zu dem ersten noch ein neuer Ton hinzuzukommen, wenn man die Ränder des verticalen Spaltes *ab* mit einander in Berührung bringt.

Wendet man statt der eisernen Hohlcylinder andere von nicht magnetischen Metallen, z. B. von Zink, von Messing etc. an, so ist kein Ton zu hören, wenn der Cylinder durch Zusammenlöthen der Ränder metallisch geschlossen, oder wenn er ganz offen ist; sobald aber die Ränder des Spaltes in Berührung gebracht werden, lässt sich jedesmal bei der Unterbrechung des Stromes in der Spirale ein eigenthümliches Ticken hören. Der Ton ist am stärksten, wenn die Ränder nur lose an einander liegen; er wird schwächer, wenn man sie fest gegen einander drückt. Zur Hervorbringung der Erscheinung genügt ein einziger Bunsen'scher Becher.

Die Töne, welche man von Metallröhren mit einander berührenden Rändern erhält, werden offenbar durch die (erst weiter unten zu besprechenden) Inductionsströme hervorgerufen, welche die Unterbrechung des die Spirale durchlaufenden Stromes in der Masse der Metallhülsen erzeugt. Für die Richtigkeit dieser Ansicht spricht auch der Umstand, dass alles, was den Inductionsstrom verstärkt. also auch namentlich das Einschieben eines Bündels von Eisendrähten in die Höhlung der Spirale, den Ton lauter macht.

Anziehung und Tragkraft der Elektromagnete. Das Gewicht, welches ein Magnet vermöge seiner Fähigkeit, weiches Eisen anzuziehen und festzuhalten, zu tragen vermag, bezeichnet man bekanntlich als dessen „Tragkraft“. Trifft man jedoch eine solche Anordnung, dass der Anker dem Magneten nicht bis zur unmittelbaren Berührung genähert werden kann, so nennt man die Kraft, mit welcher derselbe in einem gewissen Abstande von den Polflächen des Magneten festgehalten wird, die diesem Abstande entsprechende „Anziehung“. Beide Wirkungen sind nicht nur von der magnetisirenden Kraft, sondern auch von der Form und Grösse der Elektromagnete und der Anker abhängig. Betrachtet man jedoch die Wechselwirkung, welche zwischen einem bestimmten Magnet und einem bestimmten Anker stattfindet, so lässt sich die Abhängigkeit der Anziehung von der magnetisirenden Stromstärke auf ein ziemlich einfaches Gesetz zurückführen. 181

Man findet nämlich die Anziehung dem Quadrate der Stromstärke proportional. Dieses Gesetz wurde zuerst durch Versuche von Lenz und Jacobi erwiesen, welche die Anziehung direct an einer Wage bestimmten. An einem Ende ihres Wagebalkens war der Anker aufgehängt und darunter der Elektromagnet aufgestellt. Der constante Abstand

zwischen beiden wurde durch Einlegen einer Holzscheibe gesichert. Nach Tarirung des Ankers durch Gewichte, welche auf die Schale der anderen Seite gelegt wurden, wurde der Strom geschlossen und neuerdings so viel Gewicht zugelegt, bis der Anker abgehoben wurde. Dies wurde bei verschiedenen Stromstärken wiederholt. Folgende Tabelle enthält einige dieser Beobachtungen:

Länge des Magneten 21,6 cm; Dicke „ „ 4 „; Länge des Ankers 5,4 „			Länge des Magneten u. des Ankers 14,8 cm; Dicke „ „ „ „ „ 1,35 „		
Ablenkung an der Tangentenbussole	Anziehung		Ablenkung an der Tangentenbussole	Anziehung	
	beobachtet	berechnet		beobachtet	berechnet
19° 4′	13,16	13,75	15° 52′	1,46	1,64
28 48	32,45	33,44	28 52	5,65	6,16
33 8	44,13	43,05	37 42	11,49	12,10
36 27	57,45	57,51	46 37	21,16	22,68
42 26	89,10	90,34	52 44	33,81	34,99
50 35	154,10	153,1	55 30	41,97	42,89

Die berechneten Werthe der dritten Spalte sind aus den Quadraten der Tangenten der Winkel in der ersten Spalte durch Multiplication mit einem für jede Versuchsreihe constanten Factor erhalten. Ihre Uebereinstimmung mit den beobachteten Werthen beweist die Proportionalität zwischen Anziehung und Stromstärke. Dieselbe Proportionalität zeigte sich, als auch der Anker durch denselben Strom magnetisirt war, in welchem Falle jedoch die Anziehung bei gleicher Stromstärke etwa die vierfache war.

Die Proportionalität der Anziehung mit dem Quadrate der Stromstärke fand Dub auch bei hufeisenförmigen Elektromagneten zutreffend; derselbe fand ferner, dass das Gesetz, nach welchem die Anziehung mit der Entfernung des Ankers von den Magnetpolen abnimmt, von der Grösse der Anker abhängt. Dickere Anker wurden bei geringerer Entfernung schwächer, bei grösserer Entfernung stärker angezogen als dünnere.

So übereinstimmend die Versuche über elektromagnetische Anziehung die quadratische Proportionalität mit der Stromstärke bestätigt haben, so widersprechend sind die Resultate, zu welchen man bei der Untersuchung der Beziehungen zwischen Tragkraft und Stromstärke gelangt ist.

So glaubte z. B. Jacobi aus den Versuchen von Dal Negro mit hufeisenförmigen Elektromagneten auf eine einfache Proportionalität

zwischen Tragkraft und Stromstärke schliessen zu dürfen. Zu demselben Resultate gelangten sowohl Jacobi als auch Fechner auch bei anderen Versuchen mit hufeisenförmigen Elektromagneten.

Spätere Versuche von Lenz und Jacobi haben jedoch dieses Gesetz nicht mehr bestätigt und bald eine raschere, bald eine langsamere Zunahme der Tragkräfte im Vergleiche mit den Stromstärken ergeben.

Dub's Versuche mit einem Hufeisen von 2,6 cm Dicke und 15 cm Schenkellänge zeigten eine raschere Zunahme der Tragkräfte im Vergleiche mit den Stromstärken; übrigens gilt von diesen Versuchen dasselbe, was Lenz und Jacobi von einer ihrer eigenen Versuchsreihen sagten: Die Tragkräfte wachsen zwar in einem stärkeren Verhältnisse als die Ströme, indessen keineswegs im quadratischen.

J. Müller war der Erste, welcher über die Frage nach den offenbar nichts weniger als einfachen Beziehungen zwischen Tragkraft und Stromstärke Licht verbreitete, indem er vor allem die Unhaltbarkeit der Annahme darlegte, dass die Tragkraft dem Quadrate der Stromstärke proportional sein könne. Er wies darauf hin, dass, wenn man auch die quadratische Proportionalität der Tragkraft mit dem erregten Magnetismus annehmen wolle, sie doch nicht auf die Stromstärke bezogen werden könne, da die beiden letztgenannten Grössen vermöge seiner Formel §. 176 in der Relation

$$s = A \partial^{3/2} \, tg \, \frac{m}{B \partial^2}$$

zu einander stehen. Wolle man nun die Tragkraft τ mit m^2 proportional oder geradezu $\tau = m^2$ setzen, so erhalte man

$$s = A \partial^{3/2} \, tg \, \frac{\sqrt{\tau}}{B \partial^2} \quad \ldots\ldots \quad 5)$$

Die wichtigste Folgerung, zu welcher J. Müller durch diese Erwägung gelangte, war die, dass die Tragkraft bei fortwährender Steigerung der magnetisirenden Stromstärken einem Grenzwerthe sich nähern müsse. J. Müller constatirte dies auch durch Versuche; desgleichen Poggendorff. Wir werden später darauf zurückkommen.

Wenn das von J. Müller aufgestellte Tragkraftgesetz [5)] allgemeine Geltung hätte, so müsste die Tragkraft unter allen Verhältnissen langsamer wachsen als die Stromstärke. Dies steht mit einigen von den oben angeführten Versuchen von Dal Negro, Lenz, Jacobi und Dub im Widerspruche, bei welchen sich theils eine gerade Proportionalität, theils sogar ein rascheres Wachsen im Vergleiche mit der Stromstärke gezeigt hat.

Diese Widersprüche hat v. Waltenhofen in folgender Weise aufgeklärt. Er lieferte nämlich durch seine bei den verschiedensten Sättigungsgraden (von den schwächsten bis zu den stärksten Magnetisirungen) ausgeführten Versuche den Nachweis, dass jedes der angeführten Resultate innerhalb gewisser Grenzen Geltung hat. Bei beginnender

Magnetisirung wächst nämlich die Tragkraft etwas rascher als die Stromstärke, wie es z. B. die oben angeführten Versuche von Dub bei gegebenen Sättigungsgraden ergeben haben. Bei starken Magnetisirungen findet das Umgekehrte statt, nämlich ein Zurückbleiben der Tragkräfte mit Annäherung an einen Grenzwerth, in Uebereinstimmung mit den Versuchen von Müller und Poggendorff. Bei dem Uebergange aus dem ersteren Verhalten in das letztere findet für gewisse dazwischen liegende Sättigungsgrade annähernde Proportionalität statt, wie sie aus den Versuchen von Dal Negro hervorgeht. Die graphische Darstellung der Tragkraft als Function der Stromstärke führt also zu einer ähnlichen Curve mit Wendepunkt, wie die magnetische Intensitätscurve Fig. 528, S. 631, und die Müller'sche Tragkraftsformel gilt nur für die höheren Sättigungsgrade, sowie die Müller'sche Formel für den Stabmagnetismus.

Das Gesagte erhellt aus den nachstehenden Versuchen, welche v. Waltenhofen mit einem Elektromagnet ausführte, dessen Eisenkern ein 181 mm langer und 10 mm dicker halbkreisförmig gebogener Cylinder war. Der genau ebenso gestaltete Anker war bei den in der Tabelle II. angeführten Versuchen ebenso wie der Elektromagnet mit einer Magnetisirungsspirale, die derselbe Strom durchfloss, versehen, bei den Versuchen in der Tabelle I. war er ohne Draht. In den Ueberschriften bedeutet s die Stromstärke nach chemischem Maasse, p die magnetische Sättigung in Procenten, welche der Eisenkern des Elektromagneten vor dem Vorlegen des Ankers hat, τ die Tragkraft in Kilogramm (durch Abreissen mittelst einer Federwage beobachtet); $\frac{p}{s}$ lässt die Proportionalität des Magnetismus mit der Stromstärke erkennen.

Eine graphische Darstellung dieser Versuchsresultate lässt für II. ein Tragkraftsmaximum von etwa 18 kg annehmen. Man sieht, dass eine Annäherung an dasselbe schon bei Stromstärken stattfindet, bei welchen im nicht verankerten Magnet noch nicht die halbe magnetische Sättigung erreicht ist. Hieraus lässt sich erkennen, wie bedeutend der Sättigungsgrad durch das Vorlegen des Ankers erhöht und in Folge dessen eine raschere Annäherung der Tragkraft an das Maximum herbeigeführt wird.

Das raschere Anwachsen der Tragkräfte im Vergleiche mit den Stromstärken zeigt sich nur bei Sättigungsgraden von etwa 3 bis 5 Proc. (I.). — Bei den Versuchen II. mit dem elektromagnetisirten Anker tritt diese Unregelmässigkeit nicht mehr auf.

Später hat Stefan gezeigt, dass unter gewissen Voraussetzungen die Tragkraft der Magnete auf rein theoretischem Wege berechnet werden kann. Wir können hier nicht weiter darauf eingehen. Es mag daher nur noch bemerkt werden, dass Stefan auf diesem Wege z. B. für den hier beschriebenen Ringmagnet ein Tragkraftsmaximum von etwa

$19\frac{1}{2}$ kg und für die in II. angeführten Stromstärken fast genau die thatsächlich beobachteten Tragkräfte gefunden hat.

Tabelle I.

Nr.	s	p	$\frac{p}{s}$	τ
1	16,29	3,01	0,194	1,97
2	28,11	5,57	0,198	4,17
3	35,29	6,79	0,192	4,92
4	45,55	8,91	0,196	6,27
5	89,35	17,78	0,199	10,27
6	96,86	18,98	0,196	10,27
7	130,01	24,85	0,191	11,37
8	188,77	38,29	0,203	14,02
9	246,53	51,39	0,208	14,42
10	249,23	52,12	0,209	14,42

Tabelle II.

Nr.	s	p	$\frac{p}{s}$	τ
1	16,03	3,10	0,193	5,37
2	37,40	7,15	0,191	8,97
3	45,55	8,74	0,192	10,27
4	91,05	17,60	0,193	13,87
5	236,28	49,75	0,211	16,24

Vertheilung des Magnetismus im Querschnitte der 182
Eisenstäbe. Feilitzsch hat nachgewiesen, dass der Magnetismus durchaus nicht gleichförmig im Querschnitte der Elektromagnete vertheilt ist, sondern dass die äusseren Schichten einen stärkeren Magnetismus zeigen als die inneren, dass bei schwacher magnetisirender Kraft nur in den äusseren Schichten eine magnetische Erregung stattfindet*).

Die Magnetisirungsspirale, die er zu seinen Versuchen anwandte, war 102 mm lang und war aus 176 Windungen eines $1\frac{3}{4}$ mm dicken Drahtes gebildet (vier Lagen, jede zu 44 Windungen). In die Höhlung derselben wurde eine Reihe aus Eisenblech verfertigter Cylinder gesteckt, von welchen immer einer genau in den andern passte. Der äusserste hatte einen Durchmesser von 31, der innerste, d. h. der siebente, hatte einen Durchmesser von 19 mm. Die Blechdicke betrug etwas mehr als $\frac{1}{2}$ mm. Sämmtliche Cylinder waren 110 mm lang. Während ein Strom von bestimmter Stärke die Windungen durchlief, wurde nun erst der weiteste Cylinder eingeschoben und die Stärke seines Magnetismus bestimmt; dann der zweite in den ersten und nun die Bestimmung des Magnetismus der beiden Hülsen vorgenommen; darauf wurde die dritte Hülse hinzugefügt etc.

Die folgende Tabelle enthält einen Theil der Resultate einer solchen Versuchsreihe.

*) Pogg. Ann. Bd. LXXX, S. 321.

Strom-stärke	Nummer der gleichzeitig eingeschobenen Eisencylinder	Gesammtmagnetismus der Cylinder	Nummer der einzelnen Cylinder	Magnetismus in denselben
2,975	1	4,742	1	4,742
	1 + 2	6,604	2	1,961
	1 + 2 + 3	7,024	3	0,420
	1 + 2 + 3 + 4	7,199	4	0,175
8,510	1	6,347	1	6,347
	1 + 2	11,413	2	5,066
	1 + 2 + 3	15,500	3	4,087
	1 + 2 + 3 + 4	18,453	4	2,935
	1 + 2 + 3 + 4 + 5	20,019	5	1,566
	1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6	20,800	6	0,781
	1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7	21,135	7	0,335

Diese Tabelle ist wohl ohne weitere Erläuterung verständlich, und da es ja hier nur um Verhältnisszahlen zu thun ist, so ist es auch nicht nöthig, die Einheiten näher zu definiren, auf welche sich die Werthe der Stromstärke und des Magnetismus beziehen.

Aus den Zahlen dieser Tabelle lassen sich nun leicht folgende Schlüsse ziehen:

1. Der Magnetismus dringt um so tiefer in das Eisen ein, je stärker die magnetisirende Kraft der Spirale ist.

2. Jede Schicht des weichen Eisens hat einen Sättigungspunkt, und diesem Sättigungspunkte nähern sich die äussersten Schichten am schnellsten. Bei schwächeren magnetisirenden Kräften bleibt der Kern ganz unmagnetisch.

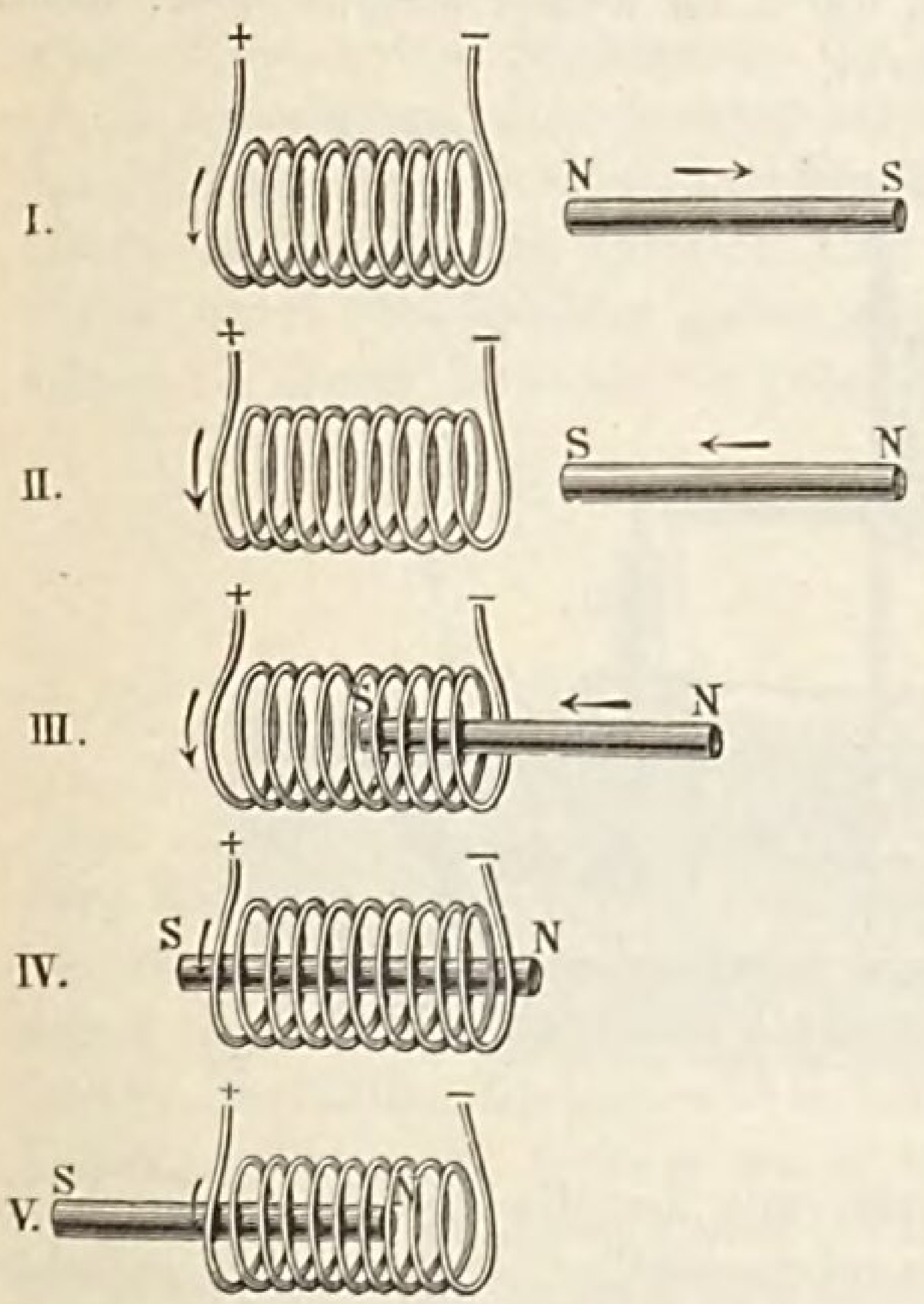
Wir haben uns vorzustellen, dass die Kraftlinien im Innern des Eisens sich gegenseitig abstossen und daher einander gegen die Aussenfläche drängen.

Darauf beruht auch das verschiedene Verhalten von massiven und von hohlen Eisenstäben, wenn dieselben in eine von einem Strom durchflossene Spirale hineingezogen werden, worauf wir unten zu sprechen kommen werden.

183 **Wirkung einer Stromspirale auf Magnete und auf weiches Eisen.** Im §. 168 haben wir die Wirkung eines Stromes auf einen Magnet kennen gelernt, welcher sich um eine zu seiner Magnetaxe senkrechte Axe drehen lässt. Hat der Stromleiter die Form eines

Kreises oder einer Spirale, so wirkt er auf beide Pole bewegend in der Richtung senkrecht auf die Windungen, und zwar abstossend oder anziehend, je nach der Art des Magnetismus und der Stromrichtung, wie es die Ampère'sche Regel angiebt. Ein innerhalb einer Spirale oder in der Verlängerung deren Axe aufgestellter drehbarer Magnet stellt sich deshalb mehr oder weniger parallel zur Axe der Spirale. Hat nun aber ein solcher Magnet nicht nur die Möglichkeit sich zu drehen, sondern ist er auch einer fortschreitenden Bewegung fähig, so wird er entweder von der Spirale in der Richtung der Axe abgestossen oder in die Spirale hineingezogen, bis seine Mitte mit der Mitte der Spirale zusammenfällt.

Fig. 533.

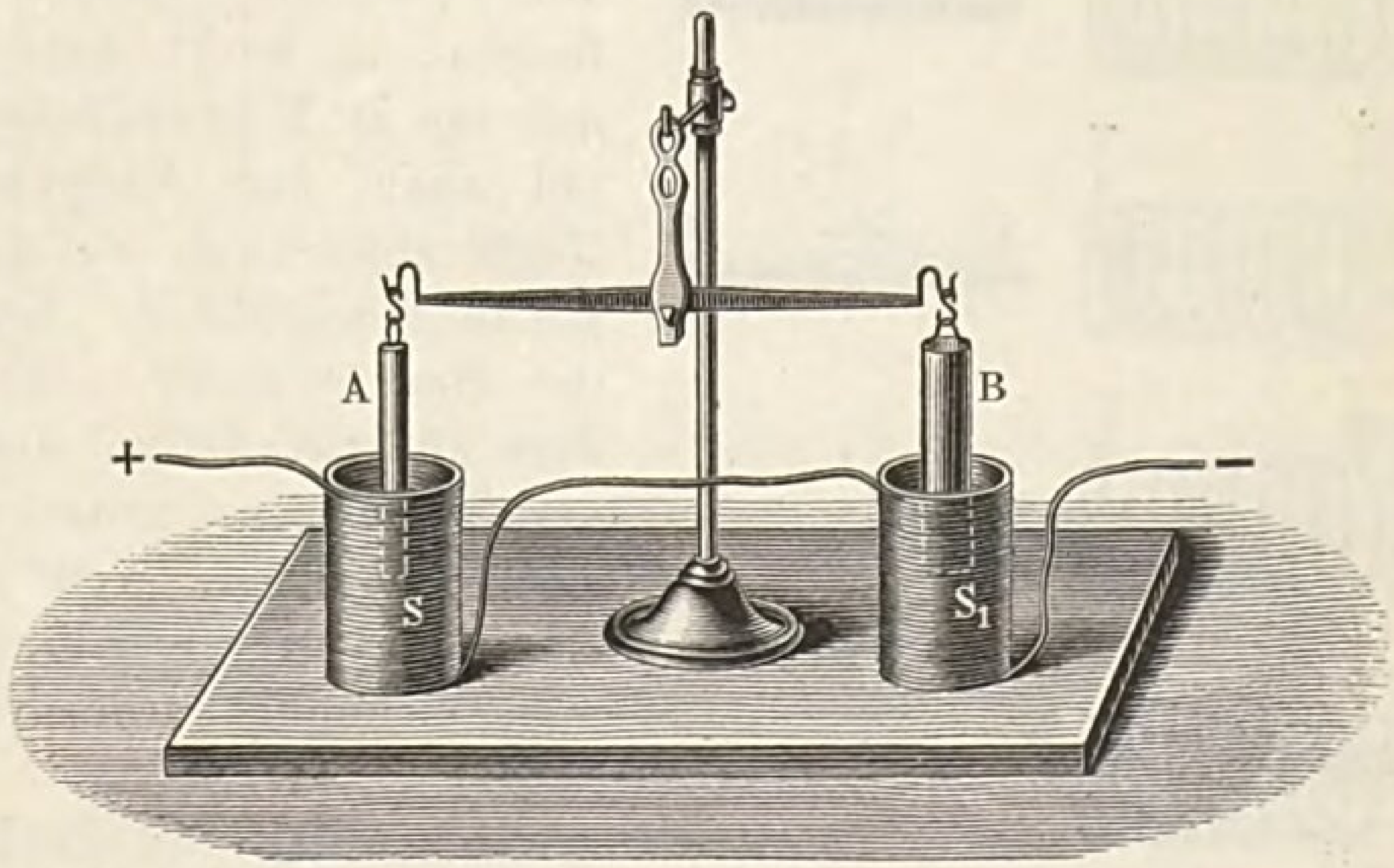


Die Fig. 533 erläutert diese Erscheinungen. Angenommen, die Spirale werde, wie in Fig. 533 I, in der Richtung des Pfeiles vom positiven Strome durchflossen, so wirkt dieser Strom auf den in *N* befindlichen Nordpol nach der Ampère'schen Regel abstossend, auf den Südpol in *S* anziehend. Kann sich der Magnet nicht drehen, sondern nur parallel zu sich selbst verschieben, so muss er abgestossen werden, weil die abstossende Wirkung auf den näher befindlichen Nordpol überwiegt.

Haben dagegen die Pole die in Fig. 533 II angedeutete Lage, so überwiegt die Anziehung des Südpols über die Abstossung des Nordpols und der Magnet wird in Folge dessen in die Spirale hineingezogen. In der Lage III muss diese Wirkung mit verstärkter Kraft fortdauern. In der Lage IV dagegen ist die Wirkung, welche den Südpol nach links treibt, ebenso gross als jene, welche den Nordpol nach rechts zu bewegen sucht. Hier befindet sich also der Magnet in stabiler Gleichgewichtslage. Hat man ihn durch die Spirale hindurch und am anderen Ende herausgeführt (Fig. 533 V), so überwiegt jetzt die Wirkung der Spirale auf den Nordpol jene auf den Südpol, in Folge dessen der Magnet nach rechts zurückgezogen wird, bis er wieder die symmetrische Gleichgewichtslage angenommen hat. Hätte der Magnet inmitten der Spirale die umgekehrte Lage der Pole, nämlich jene wie in I, so würde er sich in labilem Zustande befinden und bei der geringsten Verrückung nach rechts oder links hinausgestossen werden.

Ersetzen wir den permanenten Magnet durch einen Stab weichen Eisens, so wird derselbe bei der Annäherung an die Spirale in dem Sinne magnetisirt, wie in dem Falle II angenommen ist. Das weiche Eisen wird also jedenfalls in die Spirale hineingezogen und dann in der symmetrischen Lage ebenso festgehalten, wie ein gleich magnetisirter Stahlmagnet. Bezüglich der Kraft, mit welcher das Hineinziehen des Magnets oder Eisenstabes erfolgt, lässt sich leicht ermessen, dass dieselbe zunächst mit der Annäherung wachsen muss. Bevor jedoch die symmetrische Stellung eintritt, nimmt diese Kraft wieder ab. In der symmetrischen Stellung selbst ist sie gleich Null, bei der Weiterbewegung wird sie negativ, d. h. sie ändert die Richtung und nimmt an Intensität wieder bis zu einem Maximum zu, um dann wieder abzunehmen, wenn sich der Stab von der Spirale entfernt.

Fig. 534.



Bezüglich der Grösse der Kraft, mit der die Anziehung durch die Spirale erfolgt, besteht ein bemerkenswerther Unterschied zwischen Stahlmagnet und Eisenstab. Da nämlich der letztere desto mehr magnetisch wird, je näher er den Windungen kommt und je stärker der Strom ist, während der Stahlmagnet hiervon viel weniger beeinflusst wird, so muss eine Steigerung der Stromstärke beim Eisenstab viel wirksamer sein als beim Stahlmagnet. Nach den Versuchen von Hankel und von Dub gelten hierfür folgende Regeln:

I. Die Kraft, mit der ein Stahlmagnet in eine Spirale hineingezogen wird, ist ziemlich genau der Stromstärke und der Windungszahl der Spirale proportional.

II. Die Kraft, mit der ein weicher Eisenstab in eine Spirale hineingezogen wird, ist dem Quadrate der Stromstärke und dem Quadrate der Windungszahl proportional.

Bezüglich der übrigen quantitativen Beziehungen zwischen Form und Grösse etc. der Spirale und des Eisenstabes einerseits und der an-

ziehenden Kraft der Spirale auf letzteren müssen wir auf die ausführlichen Untersuchungen von Dub, Wiedemann, Wassmuth und v. Waltenhofen*) verweisen.

Um zu zeigen, dass weite Röhren aus dünnem Eisenblech bei Stromstärken, welche eine gewisse Grenze nicht überschreiten, viel stärker magnetisch werden, als gleich lange massive Stäbe von gleichem Gewichte, dass hingegen bei stärkeren Strömen die letzteren an Magnetismus überlegen sind (§. 182), hat v. Waltenhofen einen einfachen Apparat construirt, welchen Fig. 534 darstellt. S und S_1 sind zwei ganz gleiche Drahtspiralen, welche durch einen und denselben Strom durchflossen werden. An dem darüber hängenden Wagebalken ist einerseits der massive Eisenstab A, andererseits der hohle aus dünnem Eisenblech hergestellte, oben offene, unten geschlossene Cylinder B von grösserem Durchmesser als A aufgehängt. Durch entsprechende Tara werden beide, bevor noch ein Strom geht, ins Gleichgewicht gebracht und hängen ungefähr zur Hälfte ins Innere der Spiralen hinein. Lässt man nun einen starken Strom durch die Spiralen gehen, so sinkt der massive Stab in Folge seines bei dieser Stromstärke grösseren magnetischen Moments; vermin-

Fig. 535.

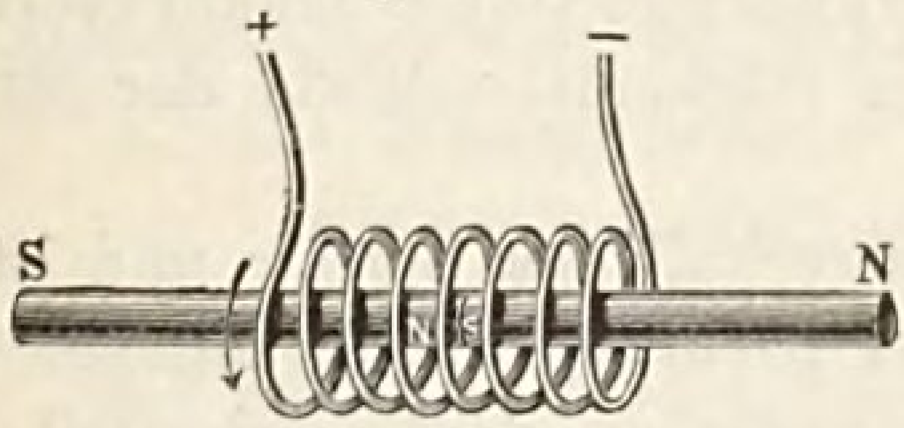
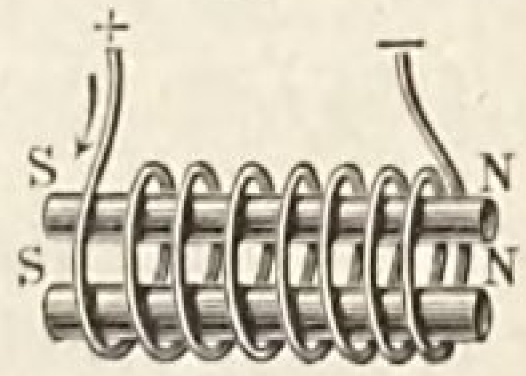


Fig. 536.



dert man die Stromstärke, etwa durch Einschaltung von Widerständen bis zu einem gewissen Grade, so sinkt dagegen das Eisenrohr. Dazwischen liegt dann eine gewisse Stromstärke, bei welcher sich der Wagebalken im labilen Gleichgewichte befindet, wo also jener Eisenkern das Uebergewicht zeigt, welcher weiter in die Spirale hineingesenkt wird.

Werden in eine von einem Strom durchflossene Spirale zwei Eisenstäbe eingeschoben, so dass ihre Axen in dieselbe Gerade fallen, so ziehen sich die Stäbe kräftig an, da die entgegengesetzten Pole an einander zu stehen kommen, Fig. 535. Schiebt man dagegen die Eisenstäbe parallel über einander, so stossen sie sich ab, weil gleichnamige Pole neben einander zu liegen kommen, Fig. 536. Steckt man mehrere leichte Eisenstäbe parallel zu einander in die Spirale, so suchen sie sich so weit als möglich von einander zu entfernen; bei hinlänglich starkem Strome vertheilen sie sich daher in nahezu gleichen Abständen an der inneren Peripherie der Spirale. Dieses Verhalten ist dem der Kraftlinien im Innern des Magnets (§. 182) analog.

Lässt man in eine mit verticaler Axe frei befestigte Spirale von hinreichender Windungszahl, welche durch einen genügend starken

*) Wien. Akad. Ber. Bd. 62 und 67.

Strom durchflossen wird, einen Stab von Stahl oder Eisen hineinfallen, so pendelt er einigemale auf und ab und bleibt dann frei schwebend hängen. Dieses Phänomen ist von v. Waltenhofen*) näher untersucht worden. Dabei hat sich ausser einigen quantitativen Beziehungen, die wir übergehen müssen, insbesondere die in praktischer Hinsicht sehr interessante Thatsache ergeben, dass das Minimum der Stromstärke, welche eben zum Schwebenbleiben gleich schwerer und gleich langer Stäbe hinreicht, in hohem Grade von der Härte des Materials abhängt. Je weicher dasselbe ist, je leichter der Stab daher Magnetismus annimmt, desto geringer ist die Stromstärke, welche eben ausreicht, um das Schwe-

Fig. 537.

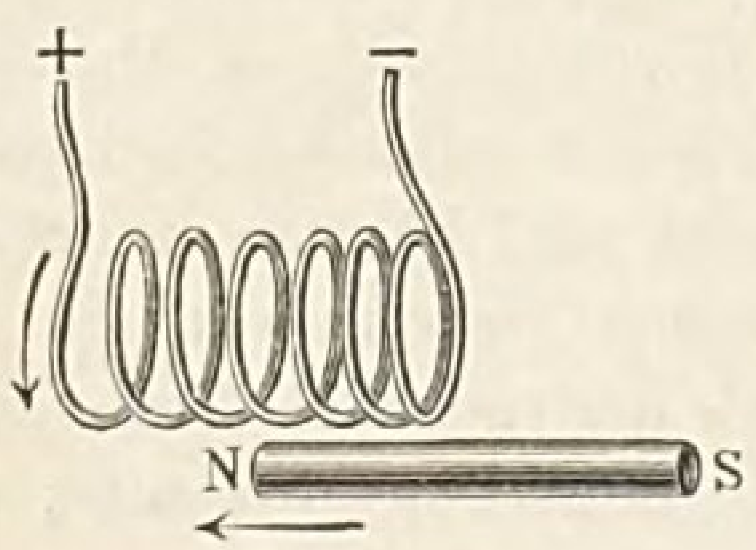
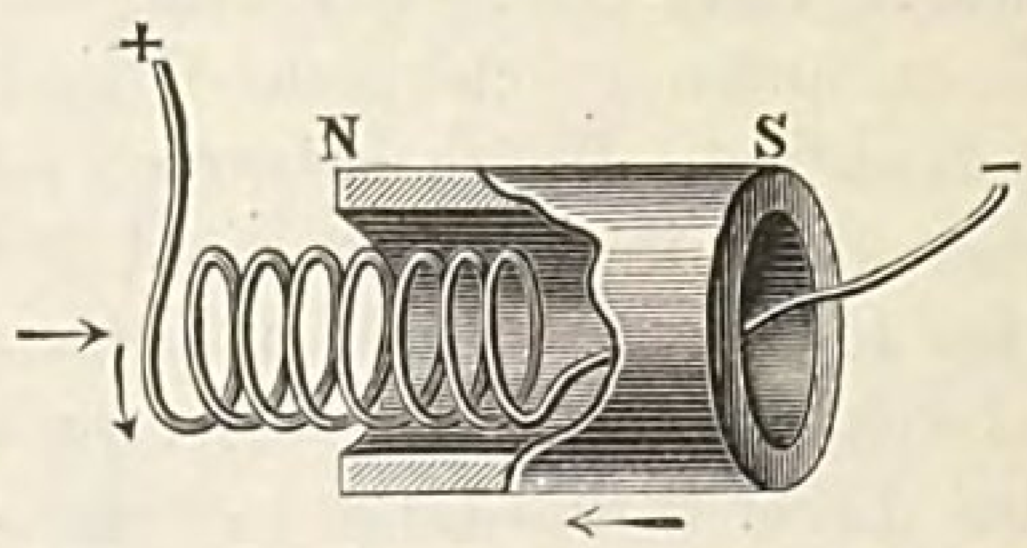


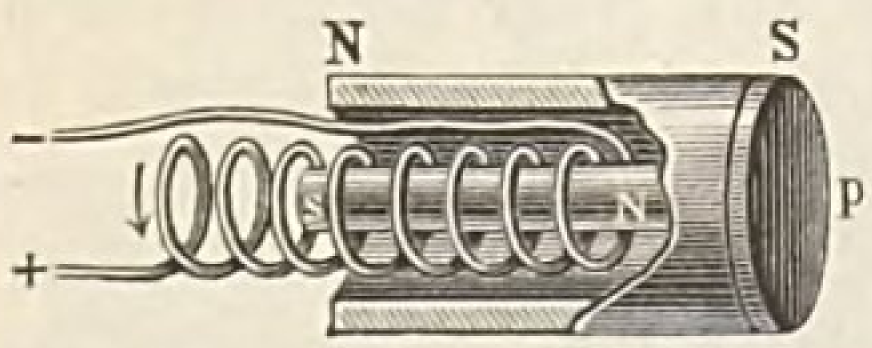
Fig. 538.



ben zu erhalten. Das darauf zu gründende Untersuchungsverfahren ist empfindlich genug, um geringfügige Härteunterschiede der Stäbe nachzuweisen.

Liegt ein weicher Eisenstab ausserhalb der Spirale und ist derselbe parallel zur Axe der Spirale in der Richtung seiner eigenen Axe verschiebbar (Fig. 537), so ist leicht einzusehen, dass er ebenfalls so lange verschoben wird, bis seine Mitte der Mitte der Spirale gegenübersteht. Nach der Ampère'schen Regel entsteht dabei ein Magnet mit entgegengesetzter Lage der Pole wie bei dem Stabe innerhalb der Spirale (Fig. 533 III). Denkt man sich nun parallel der Spirale ringsum eine ununterbrochene Reihe von Stäben angeordnet, so bilden dieselben den Uebergang zu einer concentrischen Röhre von weichem Eisen, Fig. 538. Eine solche wird also auch magnetisch und von der Spirale angezogen. Falls die Röhre feststeht und die Spirale beweglich ist, wird daher die letztere in die Röhre hineingezogen. Fig. 539 endlich zeigt noch den combinirten Fall, wo eine Spirale in den concentrischen Zwischenraum zwischen dem massiven Eisenkern und dem Eisenmantel hineingezogen wird. Die Pole von Kern und Mantel liegen verkehrt. Verbindet man das eine Ende des Kerns mit dem Ende der Röhre durch eine Platte aus weichem Eisen *p*, so erhält man eine Art Hufeisenelektromagnet, dessen einer Schenkel um den anderen Schenkel umgestülpt erscheint. Auch dieser wird die Spirale hineinziehen. Solche Elektromagnete sind von

Fig. 539.



*) Wien. Akad. Ber. 62, S. 639.

Romershausen, Dub und Kravogl construirt worden und haben eine ungefähr 3 mal so grosse Tragkraft, als der umwickelte Kern für sich allein hat. Näheres hierüber in Dub's Elektromagnetismus, wo auch noch andere Formen von Elektromagneten beschrieben sind.

Elektromagnetische Motoren. Die kräftigen Anziehungs- 184
und Abstossungserscheinungen, welche man an Elektromagneten beobachtet, führten auf den Gedanken, dieselben zum Betriebe von Maschinen zu verwenden. Die dazu construirten Apparate werden elektromagnetische Motoren genannt. Der hierfür manchmal auch gebrauchte Name „Elektromotor" kann zu Verwechslungen Anlass geben, da man auch einen stromerregenden Apparat, z. B. ein Volta'sches Element, mit diesem Ausdrucke bezeichnet findet.

Die elektromagnetischen Motoren sowie die im vorigen Paragraphen besprochenen Kraftwirkungen zwischen Spiralen und Magneten gehören eigentlich in das nächste Capitel und werden wir dort auf die allgemeine Theorie derselben zurückkommen. Des äusserlichen Zusammenhanges wegen wollen wir schon hier eine Eintheilung dieser Apparate geben und einige derselben beschreiben. Dieselben zerfallen in folgende Gruppen:

I. Apparate, bei welchen Magnetpole auf Magnetpole wirken.
 a. Die intermittirenden Pole eines Elektromagnets wirken zeitweise anziehend auf weiches Eisen. Systeme: Grüel, Zöllner, Froment, Cazal, Egger.
 b. Die wechselnden Pole eines Elektromagneten wirken abwechselnd anziehend und abstossend auf die bleibenden Pole von Stahl- oder Elektromagneten. Systeme: Dal Negro, Ritchie, d'Heureuse, Jacobi, Vorsselmann de Heer, v. Helmholtz.

II. Apparate, welche auf der Wechselwirkung von Stromspiralen auf weiches Eisen oder Magnete beruhen.
 a. Spiralen mit gleichgerichtetem Strome wirken zeitweise bewegend auf Stahl- oder Elektromagnete, oder werden von diesen in Bewegung gesetzt. Systeme: Page, Dub, Kravogl, Pacinotti, Gramme, Hefner-Alteneck.
 b. Spiralen mit wechselnder Stromrichtung wirken abwechselnd anziehend oder abstossend auf die bleibenden Pole von Stahl- oder Elektromagneten. Systeme: Stöhrer, d'Heureuse.

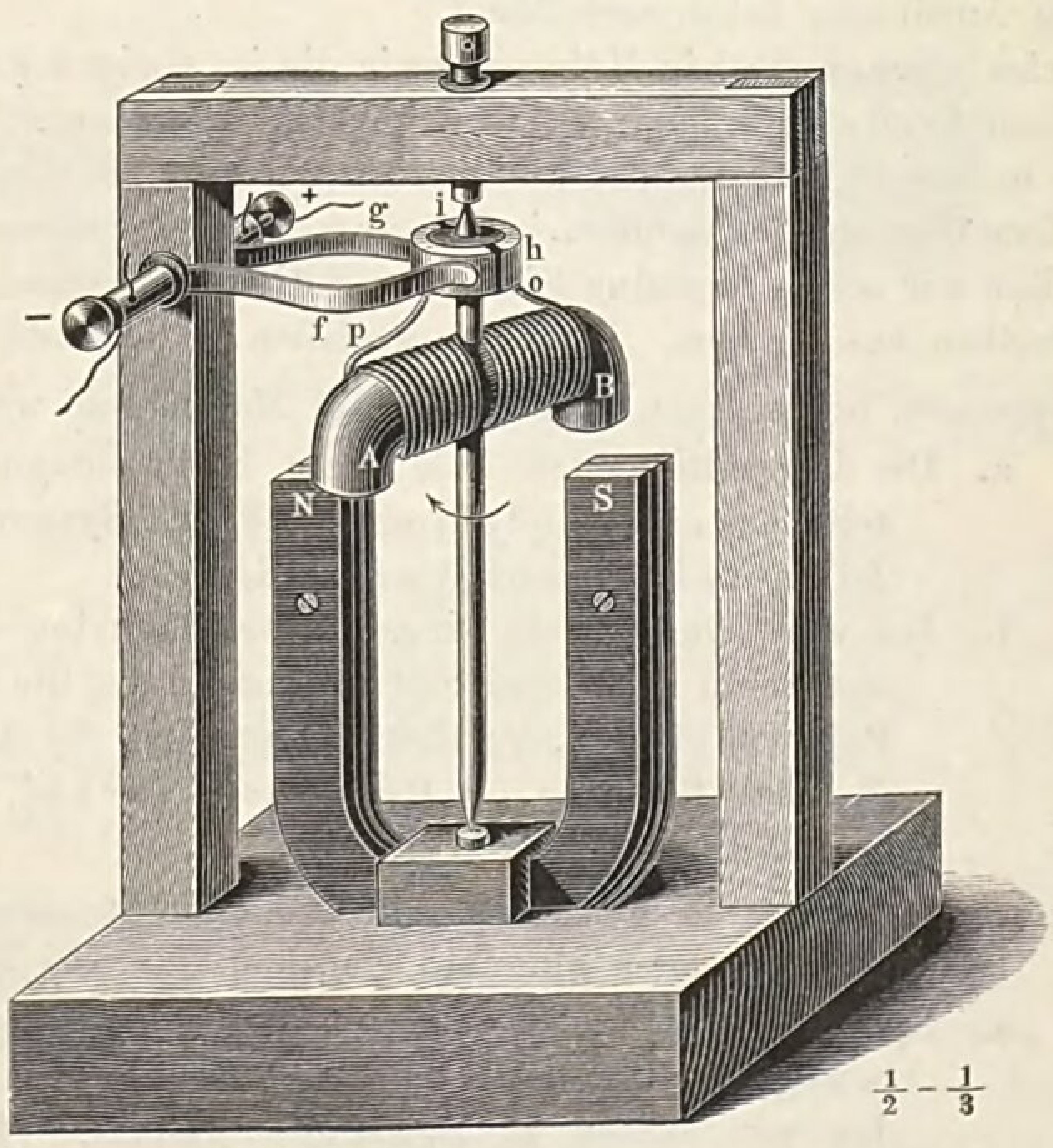
Die wesentlichen Bestandtheile jedes elektromagnetischen Motors sind also fürs erste die beiden auf einander wirkenden Theile, dann eine Vorrichtung zur rechtzeitigen Unterbrechung oder Umkehrung des Stromes (Stromsteuerung oder Commutator), endlich Bestandtheile zur weiteren Uebertragung der erzeugten Bewegung.

Als Erfinder der elektromagnetischen Motoren wird gewöhnlich Dal Negro, 1834, genannt, doch hat Prof. Jedlicka schon 1829 einen solchen gebaut. Jacobi publicirte die Beschreibung seines Apparates im Jahre 1835.

Der elektromagnetische Motor von Dal Negro beruhte auf der Oscillation eines Stahlstabes zwischen den wechselnden Polen eines Elektromagnets. Fast eben so alt ist der in physikalischen Kabineten sehr verbreitete Apparat von Ritchie (1837), wovon Fig. 540 ein Modell in einfachster Ausführung darstellt.

Ein U-förmiger Stahlmagnet ist auf einem Brett so befestigt, dass er vertical steht und seine Pole nach oben gerichtet sind. In der Mitte

Fig. 540.



zwischen den beiden Schenkeln desselben befindet sich eine verticale stählerne Axe, welche in Spitzen läuft, und an welcher ein horizontaler Elektromagnet befestigt ist, dessen Pole bei der Rotation um die verticale Axe gerade über den Polen des Stahlmagnets hinweggehen. Gerade über dem Elektromagnet ist auf der stählernen Axe der Commutator angebracht; derselbe besteht aus einer Scheibe von Hartgummi, welche von einem Messingringe umgeben ist. Dieser Ring bildet aber kein Ganzes, sondern er besteht aus zwei Hälften *h* und *i*, welche durch zwei einander diametral gegenüberliegende Zwischenräume von einander getrennt sind, also nicht in leitender Verbindung stehen, wie man in der Figur deutlich sieht.

Das eine Ende *o* der Drahtwindungen, welche den Eisenkern des Elektromagnets umkreisen, ist nun an dem Halbringe *h*, das andere Drahtende ist an dem Halbringe *i* angelöthet.

Auf dem Umfange der eben besprochenen Scheibe schleifen zu beiden Seiten zwei Metallfedern *f* und *g*, auf deren äusseren Enden die Klemmschrauben befestigt sind, welche zur Aufnahme der Poldrähte der Batterie dienen.

Nehmen wir an, in die vordere Klemmschraube sei der negative, in die hintere sei der positive Poldraht eingeschraubt, so wird bei der in unserer Figur dargestellten Lage der positive Strom durch die Feder *g* zum Halbringe *h* und von diesem durch *o* in die Windungen gelangen, während die vordere Feder auf dem Halbringe *i* schleift, also der positive Strom aus den Windungen über *i* und durch die Feder *f* austritt. Unter diesen Umständen wird das vordere Ende *A* des umströmten Eisens ein Südpol, *A* wird also von *N*, und *B* wird von *S* angezogen, der Elektromagnet dreht sich also in der durch den Pfeil angegebenen Richtung.

In dem Moment, in welchem *A* über *N* und *B* über *S* passiren, gehen die isolirenden Zwischenräume zwischen *h* und *i* unter den Federn weg, die Feder *f* kommt auf *h* und *g* kommt auf *i* zu liegen, was einen Stromwechsel und eine Umkehrung der Polarität des Elektromagnets zur Folge hat. *A* wird nun von *N* und *B* wird von *S* abgestossen, was zur Folge hat, dass die Rotation in gleicher Richtung fortdauert. Sobald *A* wieder über *S* und *B* über *N* ankommt, findet ein abermaliger Polwechsel statt, durch welchen der Elektromagnet abermals in gleicher Richtung fortgetrieben wird. Statt des Federncommutators wird oft ein solcher mittelst Quecksilbernäpfen angewendet.

Es versteht sich von selbst, dass man den Stahlmagnet in diesem Apparate auch durch einen Elektromagnet ersetzen kann, in welchem kein Polwechsel stattfindet. Man kann dann denselben Strom zuerst um den feststehenden Elektromagneten und von dort erst zum Commutator führen.

Bei dem Jacobi'schen Apparate war die Umdrehungsaxe horizontal und statt eines festen und eines beweglichen Elektromagnets kamen vier feste und vier rotirende in Anwendung. Mit einer solchen elektromagnetischen Maschine, welche durch eine Batterie von 64 constanten Zinkplatinelementen getrieben wurde, brachte er es im Jahre 1839 dahin, ein Boot auf der Newa in Bewegung zu setzen. Dadurch war die Möglichkeit des Maschinenbetriebs durch Elektromagnetismus dargethan.

Die Construction nach Fig. 540 hat den Nachtheil, dass durch die Anziehung der Pole ein schädlicher intermittirender Druck auf die untere Achsenspitze ausgeübt wird. Es empfiehlt sich daher besser, den Elektromagnet mit horizontalen Polenden zwischen den Stahlmagnetpolen rotiren zu lassen. Eine sehr zweckmässige Form des Ritschie'schen Motors, bei welcher der Stahlmagnet durch einen Elektromagnet ersetzt ist, hat

v. Helmholtz zum Betriebe von physiologischen Registrirtrommeln construirt. Fig. 541 giebt hiervon einen Aufriss. Man beachte in derselben folgende Bestandtheile:

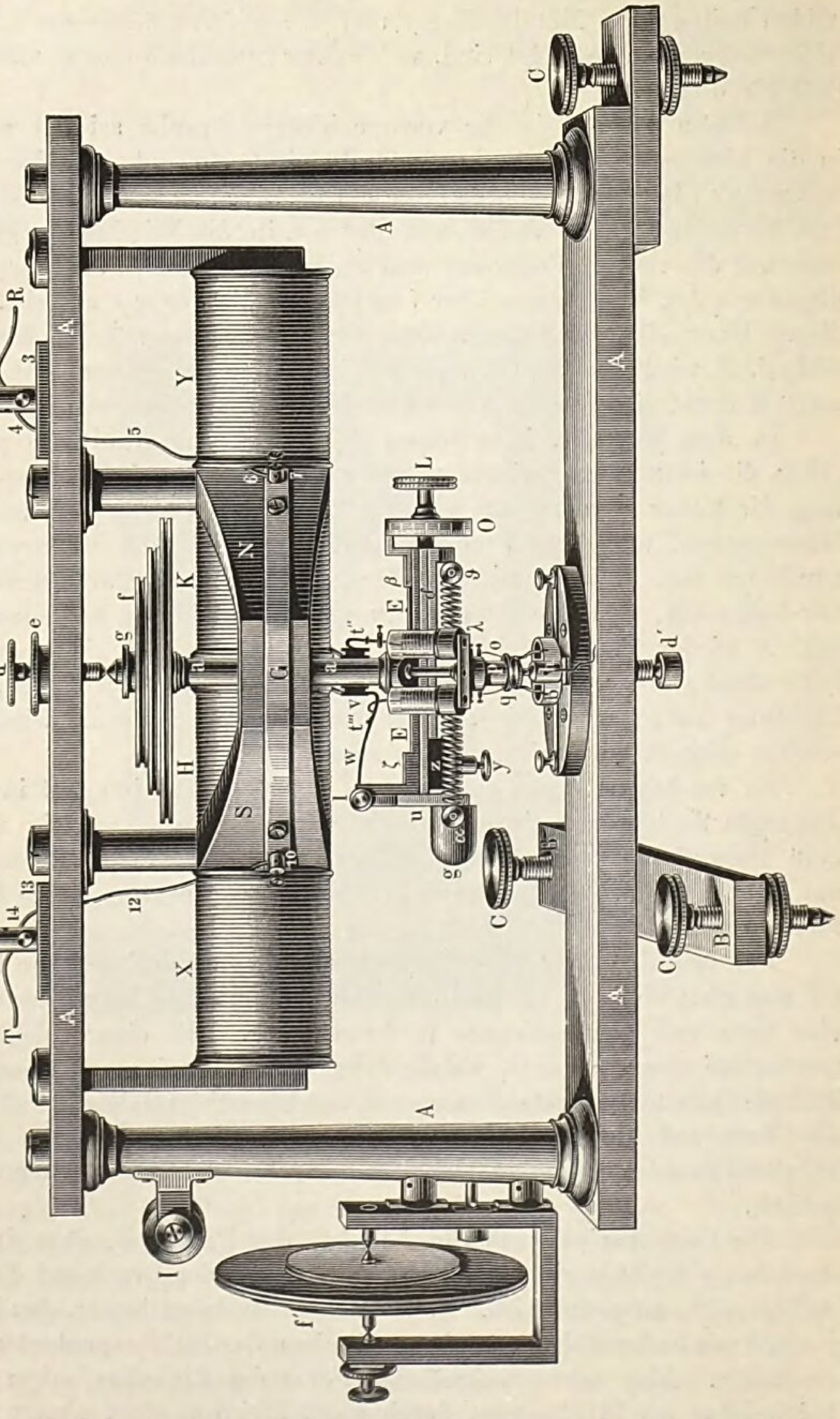


Fig. 541.

AA, *BB* das Gestelle mit den drei Fussschrauben *C*, *C*, *C* zum Horizontalstellen. *X*, *Y* zwei feststehende Elektromagnete mit horizontal liegender Axe, deren Windungen durch die Metallspange *G* mit einander verbunden sind. *S*, *N* ein horizontaler eiserner Ring, von welchem nur die vordere Hälfte sichtbar, welche sich unmittelbar an die Kerne der feststehenden Elektromagnete anlegt, so dass hierdurch deren Pole halbkreisförmig erweitert sind.

aa eine verticale Drehungsaxe, deren Lager durch die Schrauben *d* und *d'* verstellbar und durch *e* fixirbar sind.

HK zwei an der Axe *aa* befestigte, mit derselben drehbare Elektromagnete, deren nach aussen gerichtete Pole sehr nahe an den eisernen Ring *SN* hinanreichen.

f eine Schnurscheibe mit drei Rinnen von verschiedenem Radius. Eine eben solche *f'* ist in verticaler Lage auf der linken Seite angebracht. Zwei Rollen, wovon nur die vordere *I* sichtbar, vermitteln im Bedarfsfalle die Uebertragung der Bewegung von der horizontalen Schnurscheibe auf die verticale.

b ein Quecksilbernapf mit verticaler Scheidewand aus Bein dient als Commutator. Die beiden von einander isolirten Quecksilberfüllungen sind nämlich einerseits mit den Poldrähten in Verbindung, andererseits tauchen in dieselben die Platindrähte *q* und *o*, welche den Strom dem beweglichen Elektromagneten *HK* zuführen, dessen Pole daher bei jeder Umdrehung zweimal gewechselt werden. Auf dem Wege dahin passirt jedoch der Strom einen Apparat, der als Regulator der Geschwindigkeit zu fungiren hat.

EE ist ein Querarm, welcher am Ende des Trägers ζ den um das Scharnier *l* drehbaren Arm *u* trägt, an dessen unterem Ende das abgerundete Gewicht *g* befestigt ist. Dieses Gewicht wird bei der Drehung durch Centrifugalkraft von der Axe entfernt, durch die Spiralfeder λ jedoch so lange zurückgehalten, bis die Geschwindigkeit das zulässige Maximum überschreitet. Durch Drehung des Schraubenkopfs *L* kann die Spiralfeder mehr oder weniger gespannt und der Grad der Spannung an einer Eintheilung bei δ und auf der Trommel *O* abgelesen werden.

Der vom Quecksilbernapf *b* kommende Leitungsdraht *q* ist nun mit dem Metallstücke *z* in leitender Verbindung. Von dort geht der Strom auf das Gewicht *g*, dann über *u*, *l*, *w*, *v* durch die Windungen von *H* und *K* zurück nach *t''* und von dort über *O* in die andere Abtheilung des Quecksilbernapfes zurück. Sobald jedoch die Geschwindigkeit zu gross wird, entfernt sich das Gewicht *g* von der Platte *z*, wodurch der Strom unterbrochen wird, worauf die Geschwindigkeit sofort nachlassen muss. Damit zwischen *z* und *g* keine Unterbrechungsfunken auftreten, ist endlich noch zwischen *t''* und *t'''* eine Nebenschliessung mit grossem Widerstande in Form zweier mit Chlorcalciumlösung gefüllter Glascylinder eingeschaltet. Die metallischen Bodenfassungen dieser beiden Glascylinder sind unter sich metallisch verbunden. Damit die Flüssigkeit

nicht herausgeschleudert werde, sind die Glasgefässe mit ihren Mündungen gegen die Axe schief gestellt. Zwei Platindrähte führen von der Hauptleitung in die Lösung hinein. Wird daher zwischen *z* und *g* der Strom unterbrochen, so geht der Oeffnungsstrom (siehe unten) statt durch die Luft durch die Nebenschliessung, welche durch die Chlorcalciumlösung gebildet wird. Dieselbe kann übrigens mit Vortheil durch einen genügend grossen Drahtwiderstand ersetzt werden.

Nach dieser Beschreibung ist die Wirkungsweise des Apparates selbstverständlich. Mittelst 1 bis 2 Elementen, deren Pole mit *R* und *T* verbunden sind, werden die Elektromagnete *X* und *Y* sammt ihren halbkreisförmigen Fortsätzen *S* und *N* bleibend magnetisch. Die Pole einer anderen Batterie von 3 bis 4 Elementen werden mit den Abtheilungen des Quecksilbernapfes *b* verbunden und deren Strom magnetisirt die inneren Elektromagnete *H* und *K* stets im rechten Momente so, dass eine continuirliche Rotation entsteht. Soll dieselbe mit möglichst gleichförmiger Geschwindigkeit erfolgen, so wählt man den Strom der Batterie nur wenig stärker, als hinreicht, um jene Geschwindigkeit zu erzielen, bei welcher das Gewicht *g* abgezogen wird. Je stärker man die Spiralfeder λ spannt, desto grösser wird natürlich diese Geschwindigkeit.

Unter den auf Ankeranziehung beruhenden, also der Gruppe *Ia* angehörenden elektromagnetischen Maschinen scheint die von Froment construirte recht zweckmässig zu sein. Fig. 542 giebt eine perspectivische Ansicht derselben, Fig. 543 ein Schema des Verticaldurchschnittes, Fig. 544 eine vergrösserte Abbildung der Stromsteuerung. Man betrachte zunächst Fig. 543.

Am Umfange eines um die Axe *o* drehbaren Rades sind in gleichen Abständen 8 Anker aus weichem Eisen parallel zur Axe befestigt, deren Projectionen auf die Zeichnungsaxe durch α, β, γ, δ etc. dargestellt sind.

Um dieses Ankerrad herum sind an einem festen Gestelle 6 Hufeisenelektromagnete angebracht, deren Projectionen in *H*, *F*, *D*, *H'*, *F'*, *D'* . . . erscheinen. Da je zwei Anker um $^1/_8$ des Umfanges, je zwei Magnete um $^1/_6$ des Umfanges von einander abstehen, so folgt, dass, wenn ein Anker einem Elektromagnet gerade gegenübersteht, die benachbarten Anker von ihren nächsten Magneten um $^1/_6 - ^1/_8 = ^1/_{24}$ der Peripherie, also um 15 Grade, abstehen. Es ist nun die Anordnung so getroffen, dass in diesem Moment der elektrische Strom die Magnete *F* und *F'* umkreist. Indem diese die Anker β und β' anziehen, drehen sie das Rad um 15 Grade, worauf nun der Strom statt durch *F* und *F'* durch die Windungen von *D* und *D'* geleitet wird. In dieser Weise kommen bei jeder ganzen Umdrehung des Rades 24 Anziehungen zu Stande. Die Stromsteuerung hat nun folgende Einrichtung: Die Axe des Rades trägt an ihrem Ende ein kleineres Rad mit 8 Zähnen, welche den Ankern α, β, γ . . . entsprechen und zugleich mit diesen sich herumbewegen. Auf diesen Zähnen schleifen drei Federn *h*, *f*, *d*, deren Auflage-

stellen um $1/6$ der Peripherie von einander entfernt sind, deren Stellungen also den Magneten H, F, D etc. entsprechen. Der Strom wird nun

Fig. 542.

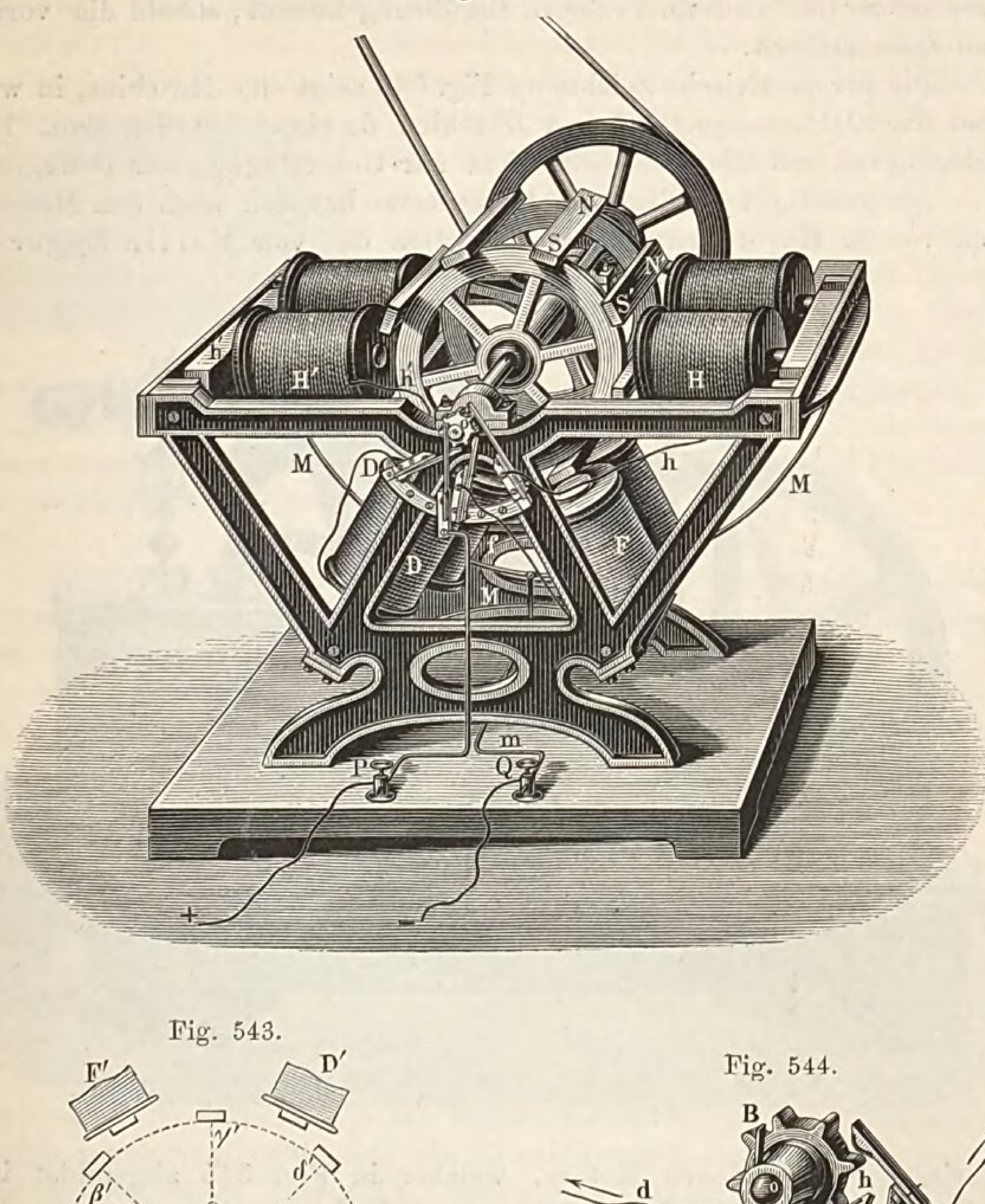


Fig. 543.

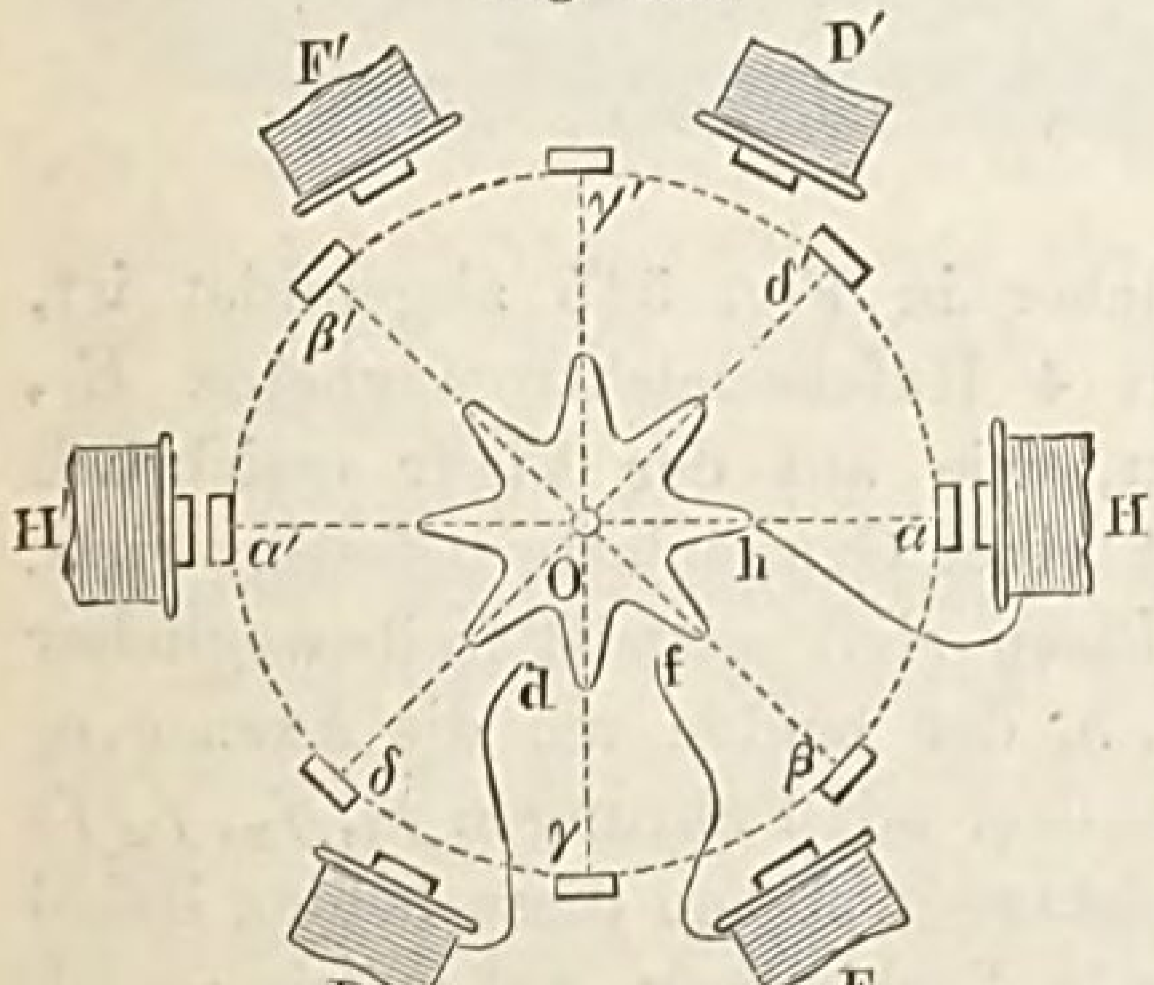
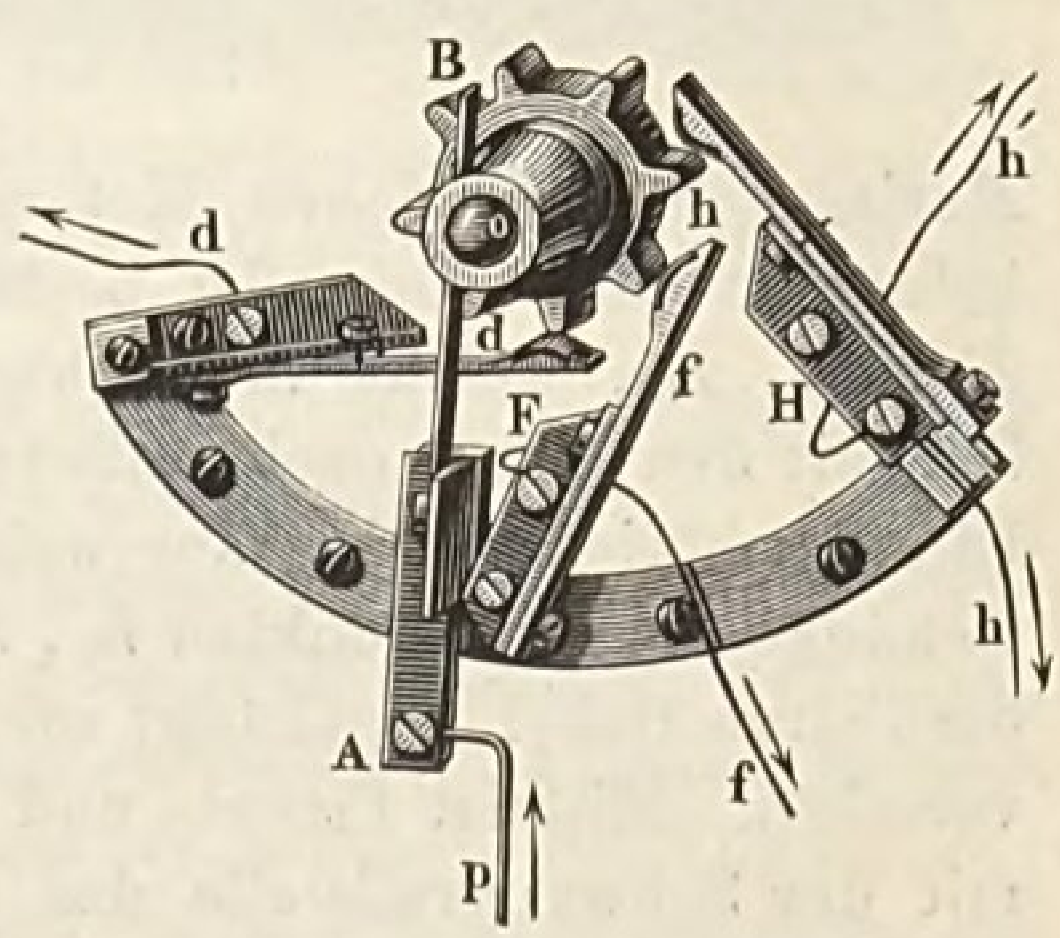


Fig. 544.



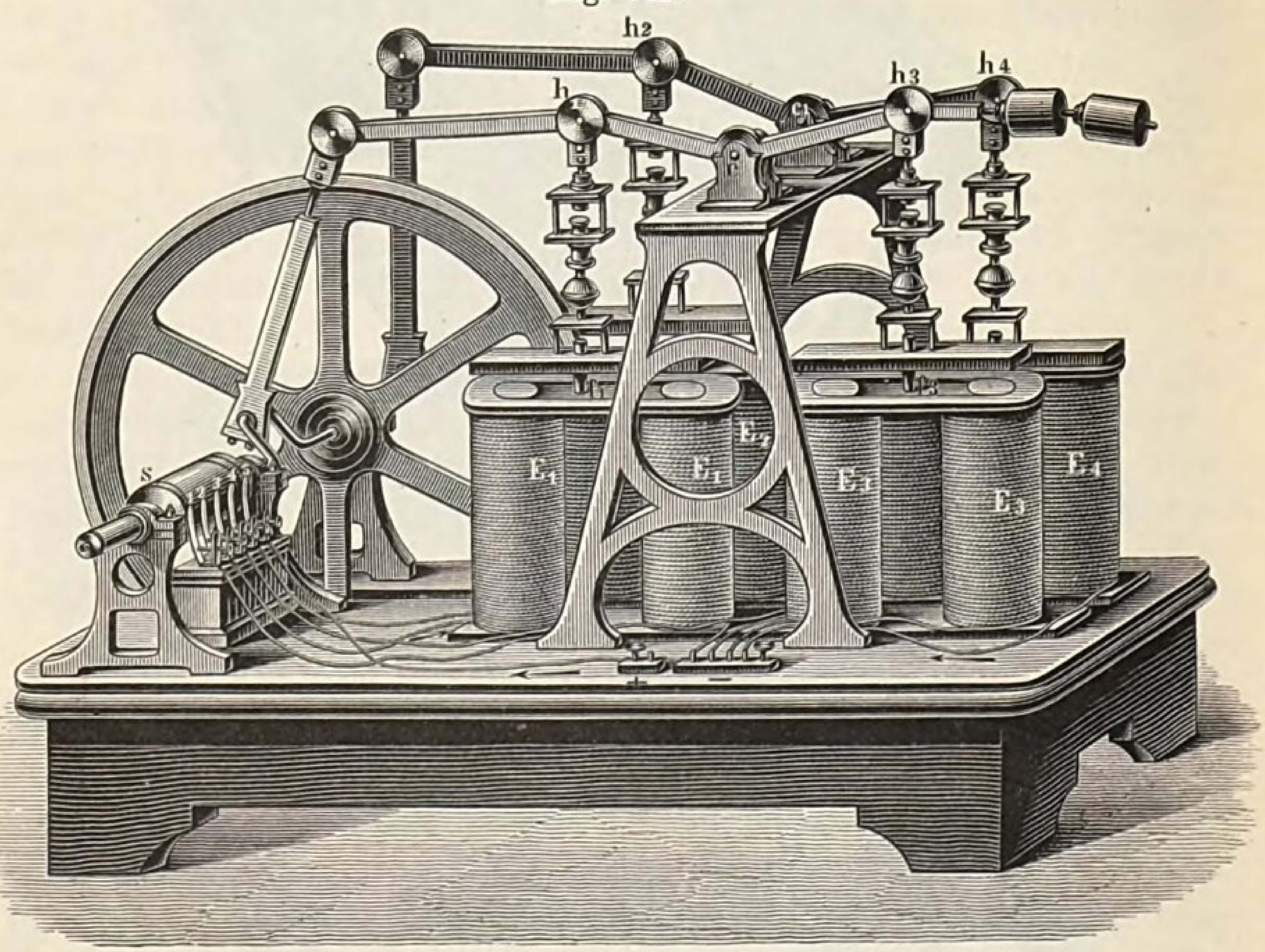
durch das an der Axe anliegende Stück AB, Fig. 544, zugeführt, geht von dort durch einen der Zähne auf die anliegende Feder und wird durch

diese den mit den gleichnamigen grossen Buchstaben bezeichneten beiden Elektromagneten zugeführt, von wo er zur Batterie zurückkehrt. Die Auflagestellen der Federn sind mit Platin überkleidet und so geformt, dass immer die nächste Feder in Berührung kommt, sobald die vorige den Zahn verlässt.

Die perspectivische Zeichnung Fig. 542 zeigt eine Maschine, in welcher die Elektromagnete F' und D' fehlen, da sie entbehrlich sind. Ein Schwungrad mit Riemenscheibe dient zur Uebertragung der Bewegung.

Als günstig bezüglich des Nutzeffectes hat sich nach den Messungen von R. Handmann die Construction des von Martin Egger in

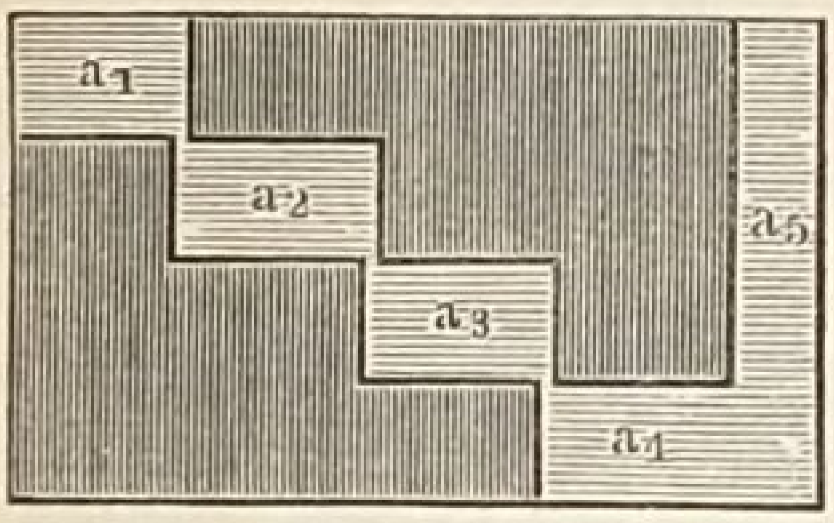
Fig. 545.



Mariaschein erfundenen Motors, welcher in Fig. 545 abgebildet ist, herausgestellt. Derselbe besteht aus 4 Hufeisenelektromagneten E_1, E_2, E_3, E_4, welche in Rechteckform, wie aus der Figur ersichtlich ist, mit den Polen nach aufwärts auf einer Grundplatte befestigt sind. Die zugehörigen Anker aus weichem Eisen sind mittelst freibeweglicher Gehänge an den Punkten h_1, h_2, h_3, h_4 der beiden um die Axen c, c_1 drehbaren Hebel angehängt und ausserdem mit Führungen f_1, f_2, f_3, f_4 versehen. Mittelst Pleuel- und Kurbelstangen stehen diese beiden Hebel mit der Schwungradwelle des Motors in Verbindung, auf welcher auch die Stromsteuerung s angebracht ist. Letztere besteht aus einer Walze, gegen welche 5 Metallfedern angedrückt sind, so dass sie neben einander über die Oberfläche derselben schleifen. Denkt man sich diese Oberfläche

in eine Ebene abgewickelt, so hat dieselbe die in Fig. 546 abgebildete Gestaltung. Die Flächenstücke a_1, a_2, a_3, a_4 und a_5 sind metallisch leitend, das Uebrige isolirend. Der von der Batterie kommende Strom wird nun durch die Feder 5 auf die Fläche a_5 und von da auf alle anderen 4 leitenden Flächenstücke geführt und geht dann bei Drehung der Walze der Reihe nach auf die Federn 1, 2, 3, 4 über, welche denselben dann nach einander den Elektromagneten E_1, E_2, E_3, E_4 zuführen. Die anderen Enden der Windungen führen dann den Strom zur Batterie zurück. Durch Kautschukringe, welche die oberen Enden der Elektromagnete umgeben, wird verhindert, dass die Anker zur unmittelbaren Berührung der Pole gelangen.

Fig. 546.



Die zweite Gruppe der elektrischen Motoren werden wir wegen ihres engen Zusammenhanges mit den dynamoelektrischen Maschinen im nächsten Capitel besprechen.

Die elektrische Telegraphie. Bereits in der letzten Hälfte 185
des achtzehnten Jahrhunderts hatte man Versuche gemacht, die Reibungselektricität zum Telegraphiren zu benutzen, nachdem man sich von der grossen Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Elektricität überzeugt hatte. Alle nach dieser Seite hin gerichteten Bestrebungen scheiterten aber an der Unbeständigkeit der Elektrisirmaschine, ihrer Abhängigkeit von dem Feuchtigkeitszustande der Luft, und insbesondere an der Schwierigkeit einer genügenden Isolirung der Leitungsdrähte etc.

Bald nach Entdeckung des Galvanismus und der Volta'schen Säule versuchte man, und zwar zuerst in Deutschland, den galvanischen Strom zur Telegraphie zu benutzen. Sömmering in München construirte 1808 den ersten elektrischen Telegraphen, indem er die Wasserzersetzung zur Zeichengebung benutzte. Hörbare Signale brachte er dadurch hervor, dass an der Empfangsstation das durch den Strom entwickelte Knallgas eine unter Wasser befindliche Glocke füllte, welche dadurch gehoben wurde und ein Glockenzeichen auslöste. Die Kriegswirren jener Zeiten liessen die Erfindung in Deutschland damals in Vergessenheit gerathen.

Vorsselmann de Heer construirte einen elektrischen Telegraphen mit Hülfe der physiologischen Wirkungen des Stromes.

Eine wirklich praktische Richtung nahmen die Versuche der elektrischen Telegraphie erst nach Entdeckung des Elektromagnetismus durch Oersted 1820, indem Ampère vorschlug, an Stelle der Platinelektroden in Sömmering's Apparat Magnetnadeln zu setzen. Schilling von Cannstadt wandte 1832 zuerst nur zwei Drähte und eine Magnetnadel an, welche er durch wechselnde Ströme ablenkte; allein erst Gauss und Weber haben im Jahre 1833 einen derartigen Apparat im Grossen aus-

geführt. Die Leitungsdrähte waren zwischen dem physikalischen Cabinet und der Sternwarte zu Göttingen über die Häuser der Stadt hin ausgespannt worden. Der Observationsapparat auf der einen Station bestand aus einem Gauss'schen Magnetometer, dessen Stab, wie in Fig. 491, S. 605, mit zahlreichen Multiplicatorwindungen umgeben war, welche die Schliessung der Zuleitungsdrähte auf dieser Seite bildeten. Indem nun auf der anderen Station ein momentaner Strom in der einen oder anderen Richtung erzeugt wurde, machte der Magnetstab eine durch das Fernrohr zu beobachtende Zuckung nach der rechten oder nach der linken Seite.

Durch Combination dieser beiden Elementarzeichen (Ausschlag rechts und Ausschlag links) wurde das Alphabet gebildet.

Es waren nicht galvanisch erzeugte Ströme, welche hier in Anwendung gebracht wurden, sondern Inductionsströme, wie wir sie im nächsten Capitel werden kennen lernen.

Steinheil machte sich dann 1838 um die Vervollkommnung der elektrischen Telegraphie inbesondere dadurch verdient, dass er die Anzahl der nöthigen Drahtleitungen auf eine einzige reducirte. Er entdeckte nämlich bei seinen Versuchen auf der Nürnberg-Fürther Eisenbahn, dass sich das Erdreich selbst zur Rückleitung des Stromes benutzen lasse. Auf welche Weise dies ermöglicht wird, werden wir weiter unten sehen.

Darf somit Deutschland den Ruhm der Erfindung der elektrischen Telegraphie für sich in Anspruch nehmen, so sind bei der Construction jener Telegraphenapparate, welche diese Erfindung dem allgemeinen Verkehr nutzbar machten, der Engländer Wheatstone, der Franzose Breguet und der Amerikaner Morse hervorragend betheiligt.

Jeder vollständige Telegraphenapparat besteht ausser der Drahtleitung aus dem Aufgeber oder Manipulator und dem Empfänger oder Receptor. Je nach der Construction des letzteren unterscheidet man als Hauptsysteme:

I. Nadeltelegraphen, bei welchen die Buchstaben durch Combination von Magnetnadelausschlägen hervorgebracht werden;

II. Zeigertelegraphen, bei welchen sich ein Zeiger vor einem Buchstabenkreise bewegt und vor dem zu signalisirenden Buchstaben eine Weile stehen bleibt;

III. Schreibtelegraphen, bei welchen ein Stift durch Punkte und Striche, die er auf einem Papierstreifen hervorbringt, die Buchstaben signalisirt;

IV. Drucktelegraphen, welche die übersendete Depesche direct mit gewöhnlichen Buchstaben auf Papier gedruckt anfertigen; endlich

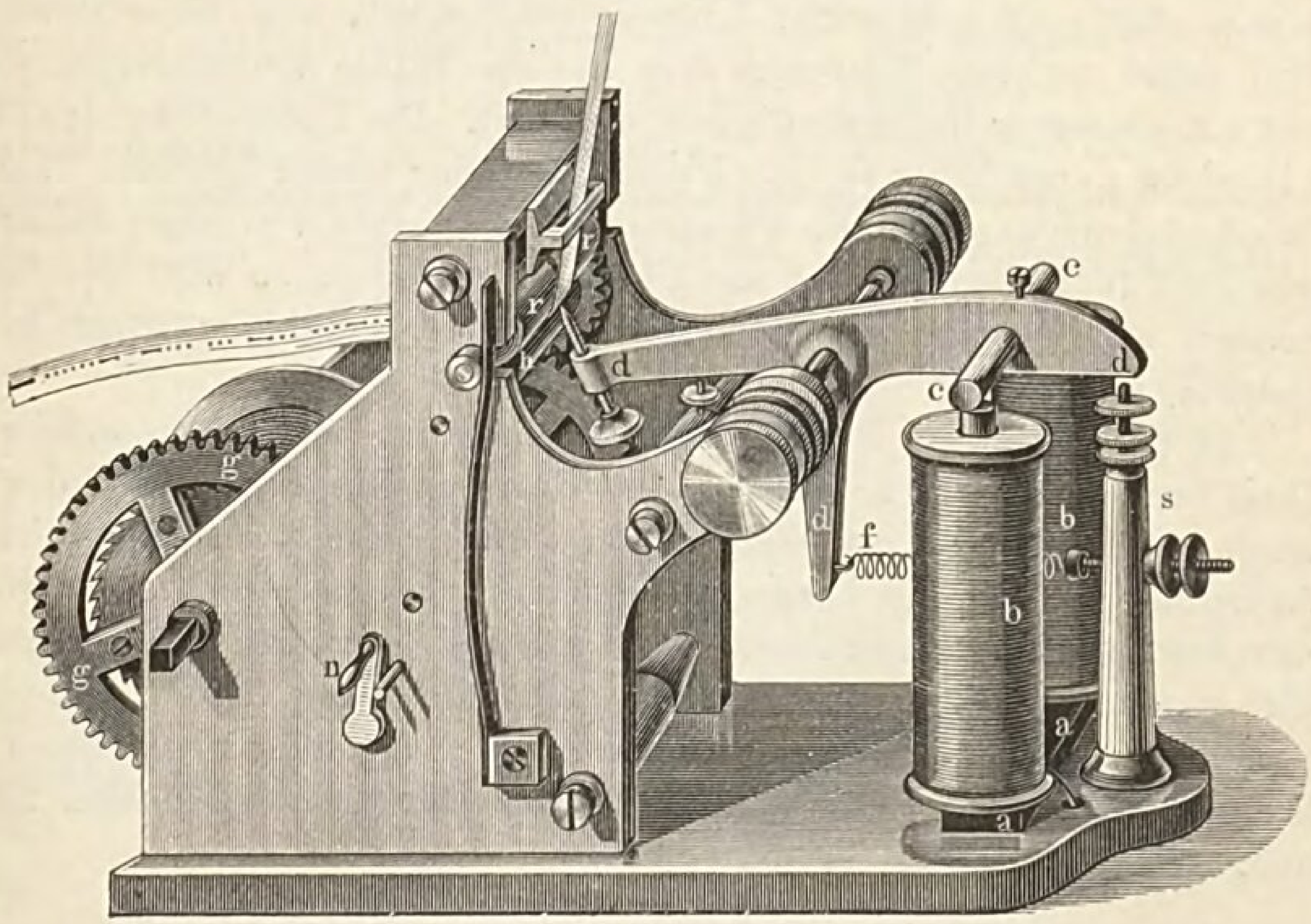
V. Pantelegraphen, welche jeden beliebigen Schriftzug oder auch eine Zeichnung getreu übermitteln und auf chemischen Wirkungen des Stromes beruhen.

Dazu käme dann als VI. System das später zu besprechende Telephon, welches direct die gesprochenen Worte oder Töne hörbar an der Empfangsstation hervorbringt.

Es ist nicht die Aufgabe unseres Buches, diese Systeme sämmtlich zu beschreiben, da es sich dabei vielfach nur um die technische Ausführung der physikalischen Principien handelt, welche letzteren uns hier vorwiegend interessiren. Wir wollen daher nur einige dieser Apparate etwas näher kennen lehren und zwar vor Allem den Schreibtelegraphen von Morse, welcher unter allen der verbreitetste geworden ist.

Morse's Schreibtelegraph; Hughes' Drucktelegraph; 186
Caselli's Pantelegraph. Bereits im Jahre 1832 kam der Amerikaner Morse auf den Gedanken, Elektromagnete zur Telegraphie zu

Fig. 547.



benutzen; aber erst nach vielen mühevollen Versuchen kam er zum Ziele, und im Jahre 1837 wurde die Einrichtung seines Schreibtelegraphen bekannt gemacht. Er zeichnet sich durch grosse Einfachheit aus und hat vor den älteren Telegraphen den grossen Vortheil, dass er nicht bloss vorübergehende Zeichen giebt, sondern ein bleibendes Actenstück liefert. Diese Telegraphen sind mit verschiedenen Modificationen jetzt fast überall eingeführt.

Fig. 547 stellt den Morse'schen Schreibapparat in $^1/_3$ der natürlichen Grösse dar. Auf einer eisernen Platte *a* sind zwei Stäbchen von Eisen befestigt, welche, mit den Magnetisirungsspiralen *b* umgeben, einen Hufeisenmagneten bilden. Ueber den Polen schwebt in einiger Entfernung der Eisenstab *c*, welcher in dem Messinghebel *d* steckt. Sobald

die Eisenkerne magnetisch werden, wird das rechte Ende des Hebels *d* niedergezogen; wenn die Eisenkerne ihren Magnetismus verlieren, so wird der Hebel durch eine an einem Seitenarm des Hebels *d* ziehende Feder *f* in seine alte Stellung zurückgezogen.

Der Hebelarm *d* schlägt mit seinem Ende auf der rechten Seite schon auf, bevor noch der Anker *c* vollständig in Berührung mit den Polen des Elektromagnets gekommen ist, weil bei vollkommen anliegendem Anker der Elektromagnet nach Unterbrechung des Stromes seinen Magnetismus nicht ganz verliert, wodurch der Gang des Apparates sehr erschwert und unsicher werden würde.

An seinem linken Ende trägt der Hebel *d* einen Stahlstift, welcher bei jedem Niedergange des Stabes *c* gegen einen Papierstreifen gedrückt wird, den ein Uhrwerk mit gleichmässiger Geschwindigkeit fortzieht.

Das erste Rad *g* dieses Uhrwerkes wird durch ein an der Welle desselben angehängtes Gewicht langsam umgedreht, und diese Bewegung wird durch mehrere Zwischenräder auf die Walze *h* übertragen, welche sich mit grösserer Geschwindigkeit umdreht. Die Umdrehung der Walze *h* bewirkt durch Reibung die Umdrehung der gleich grossen Walze *r*. Zwischen beiden steckt ein Papierstreifen, welcher von einer höher aufgestellten Rolle kommt. Ist das Uhrwerk im Gange, so wird der Papierstreifen mit gleichförmiger Geschwindigkeit, ungefähr 3 cm in der Secunde, fortgezogen.

In der Mitte der Rolle *r* befindet sich eine Rinne, von welcher ein Theil noch in der Figur sichtbar ist. In diese Rinne wird nun der Stift hineingedrückt, wenn *c* niedergezogen wird; es presst also der Stift eine Vertiefung in den die Rinne überdeckenden Papierstreifen. Wird der galvanische Strom nur für einen Augenblick geschlossen, so drückt der Stift einen Punkt in das Papier, bleibt aber der Strom einige Zeit geschlossen, so entsteht ein Strich, weil ja das Papier unterdessen fortgezogen wird. Aus Punkten und Strichen ist nun das Alphabet zusammengesetzt, wie folgt:

Die Schriftsprache für das Morse-System.

Alphabet.

A	·—	I	··	R	·—·
Ae	·—·—	J	·———	S	···
B	—···	K	—·—	T	—
C	—·—·	L	·—··	U	··—
Ch	————	M	——	Ue	··——
D	—··	N	—·	V	···—
E	·	O	———	W	·——
F	··—·	Oe	———·	X	—··—
G	——·	P	·——·	Y	—·——
H	····	Q	——·—	Z	——··

(* = abgekürzt)

Zahlen.

1	·—*———	6	—····	Trennungszeichen zur Trennung der Adresse, Unterschrift vom Text:
2	··—*——	7	—*—···	—···—
3	···—*—	8	——*—··	
4	····—	9	———*—·	
5	·····	10	————*—	

Interpunktionen.

Punkt	.	······	Bindestrich	-	—····—
Semikolon	;	—·—·—·	Apostroph	’	·————·
Komma	,	·—·—·—	Bruchstrich	/	———————
Kolon	:	———···	Parenthese	()	—·——·—
Fragezeichen	?	··——··	a linea		·—·—··
Ausrufungszeichen	!	——··——	franz. e	é	··—··
Anführungszeich.	„ “	·—··—·	Unterstrichen		··——·—

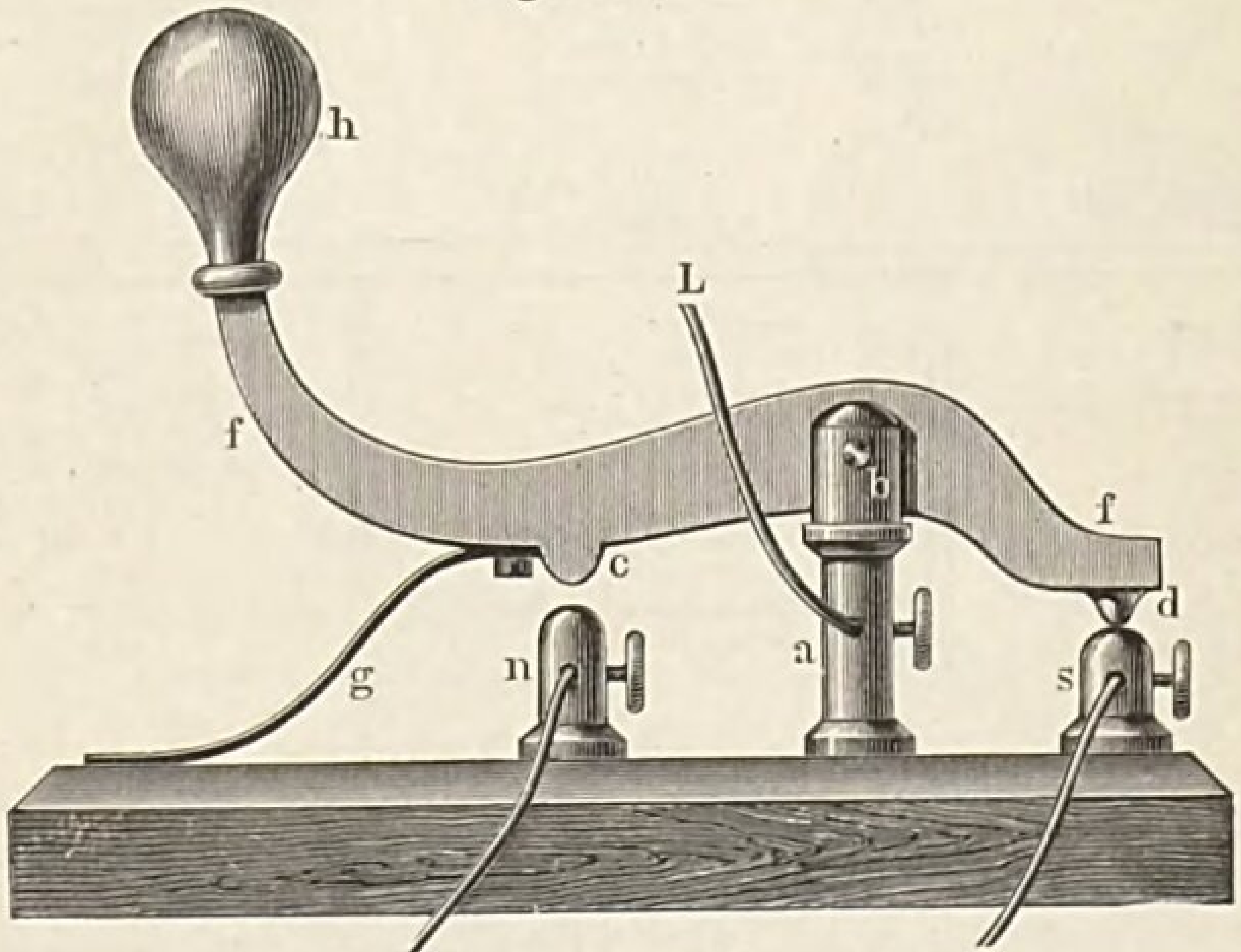
Phrasen.

Staats-Depesche	···	Correction	··········
Bahn-Betriebs-Dep.	—···	Schluss	·—·—·—·
Telegraph.-Amts-Dep.	·—	Warten	·—···
Privat-Depesche	·——·	Dringend	—··
Anruf	—·—·—·—	Sehr dringend	—··—··
Verstanden	···—·	Quittung	·—··—··—·

Zum sicheren Schliessen und Oeffnen der Kette dient ein Apparat, der den Namen des **Schlüssels** führt. Der Schlüssel des **Morse'**schen Apparates ist Fig. 548 in $^1/_3$ der natürlichen Grösse abgebildet. Auf einem Brettchen ist ein Messingsäulchen *a* aufgesetzt, in welchem die horizontale stählerne Drehungsaxe des messingenen Hebels *f* befestigt ist. Dieser Hebel wird durch eine Stahlfeder *g* nach vorn gedrückt, so dass die Messingwarze *d* auf dem Messingsäulchen *s* aufsitzt. Drückt man den Hebel, am Handgriff *h* anfassend, nieder, so kommt die Hervorragung *c* des Hebels *f* mit dem Messingsäulchen *n* in Berührung, während die vordere Spitze des Hebels nun in die Höhe gehoben ist, also nicht mehr mit dem Säulchen *s* in leitender Verbindung steht.

Das Messingsäulchen *a* ist durch den Draht *L* mit der Drahtleitung in Verbindung gesetzt, welche zur nächsten Station führt.

Fig. 548.



Von *n* führt ein Draht *K* zu dem einen Pol, etwa dem Kupferpol der galvanischen Batterie. Von *s* geht ein Draht *E* aus, der zu den Windungen des Elektromagnets führt, nach deren Passirung er sich verzweigt, indem ein Zweig zum Zinkpol der Batterie, der andere zu einer im feuchten Boden vergrabenen Kupferplatte, der sogenannten **Erdplatte**, geführt ist.

Fig. 549 stellt zwei mit einander verbundene Stationen dar. *b* und *b'* sind die Batterien, *s* und *s'* die Schlüssel, *m* und *m'* die Elektromagnete des Schreibapparates.

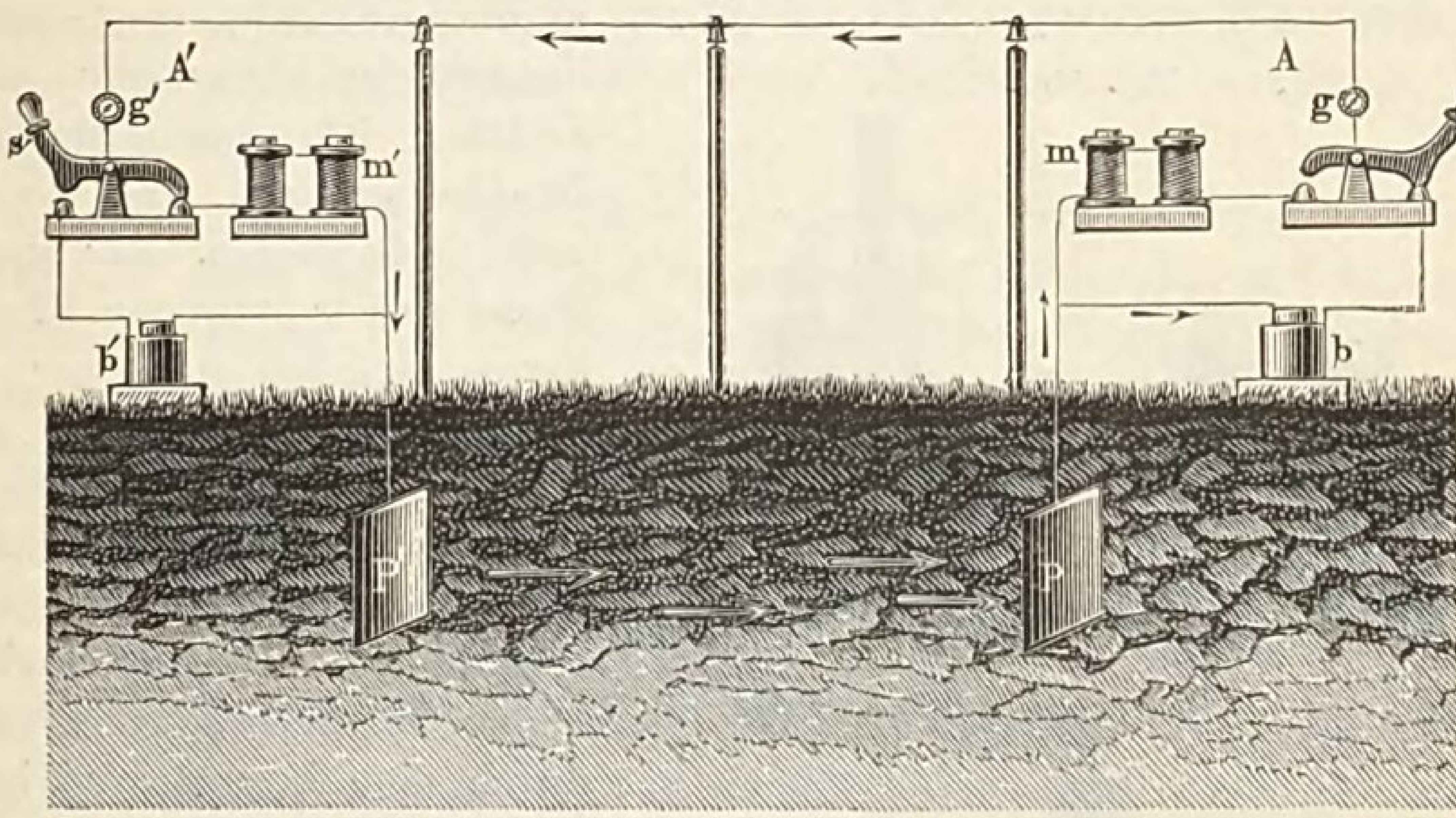
Sind beide Schlüssel in der Ruhelage, wie es in unserer Figur bei dem Schlüssel der Station links der Fall ist, so kann kein Strom entstehen; denn bei dem Messingkegel *n* (Fig. 552) ist die Leitung unterbrochen. Wird aber der Schlüssel auf einer Station niedergedrückt, wie es in unserer Figur für die Station rechts der Fall ist, so ist der Schliessungsbogen für die Batterie dieser Station hergestellt, der Strom

geht vom positiven Pol der Batterie *b* durch den Schlüssel *s* zum Leitungsdraht, welcher den Strom zum Schlüssel *s'* der anderen Station führt; von diesem gelangt der Strom zu den Windungen des Elektromagnets *m'*, zur Erdplatte *P'*, geht dann durch den Erdboden über *P* zum negativen Pol von *b* zurück, wie denn dieser Lauf des Stromes durch die Pfeile hinlänglich bezeichnet ist.

So umkreist dann der auf der Station *b* erzeugte Strom nur den Elektromagneten der Empfangsstation auf der linken Seite; die dortige Batterie ist nicht geschlossen, kann also keinen Strom aussenden.

Will der Telegraphist der einen Station, etwa der rechten, eine Depesche abgehen lassen, so drückt er mehrmals rasch hinter einander seinen Schlüssel nieder, wodurch ein abwechselndes An- und Abziehen

Fig. 549.



der Anker des Elektromagnetes *m'* erfolgt. Das dadurch hervorgebrachte Klappern macht den Telegraphisten der anderen Station aufmerksam, welcher nun, nachdem er auf ähnliche Weise geantwortet hat, sein Uhrwerk mittelst des kleinen Hebels *n* (Fig. 547, S. 659) auslöst und seinen Papierstreifen laufen lässt. Der Telegraphist der sprechenden Station drückt nun in den gehörigen Intervallen seinen Schlüssel nieder, um dadurch auf dem Streifen der anderen Station die beabsichtigten Zeichen, Punkte und Striche hervorzubringen. Zum Zeichen, dass die Depesche beendigt ist, macht er eine Reihe von 20 bis 30 gleichmässig auf einander folgenden Punkten.

Ganz so einfach, wie es eben beschrieben wurde, bleibt aber die Sache in der Praxis doch nicht. Der Strom, welcher erforderlich ist, um einen Morse'schen Schreibapparat in Gang zu setzen, muss ziemlich stark sein, denn sonst wird der Anker *c* nicht mit hinlänglicher Kraft angezogen, der Stahlstift nicht mit hinlänglicher Kraft gegen das Papier gedrückt, um deutliche Eindrücke in demselben hervorzubringen; um aber einen zu diesem Zwecke hinlänglich starken Strom durch eine

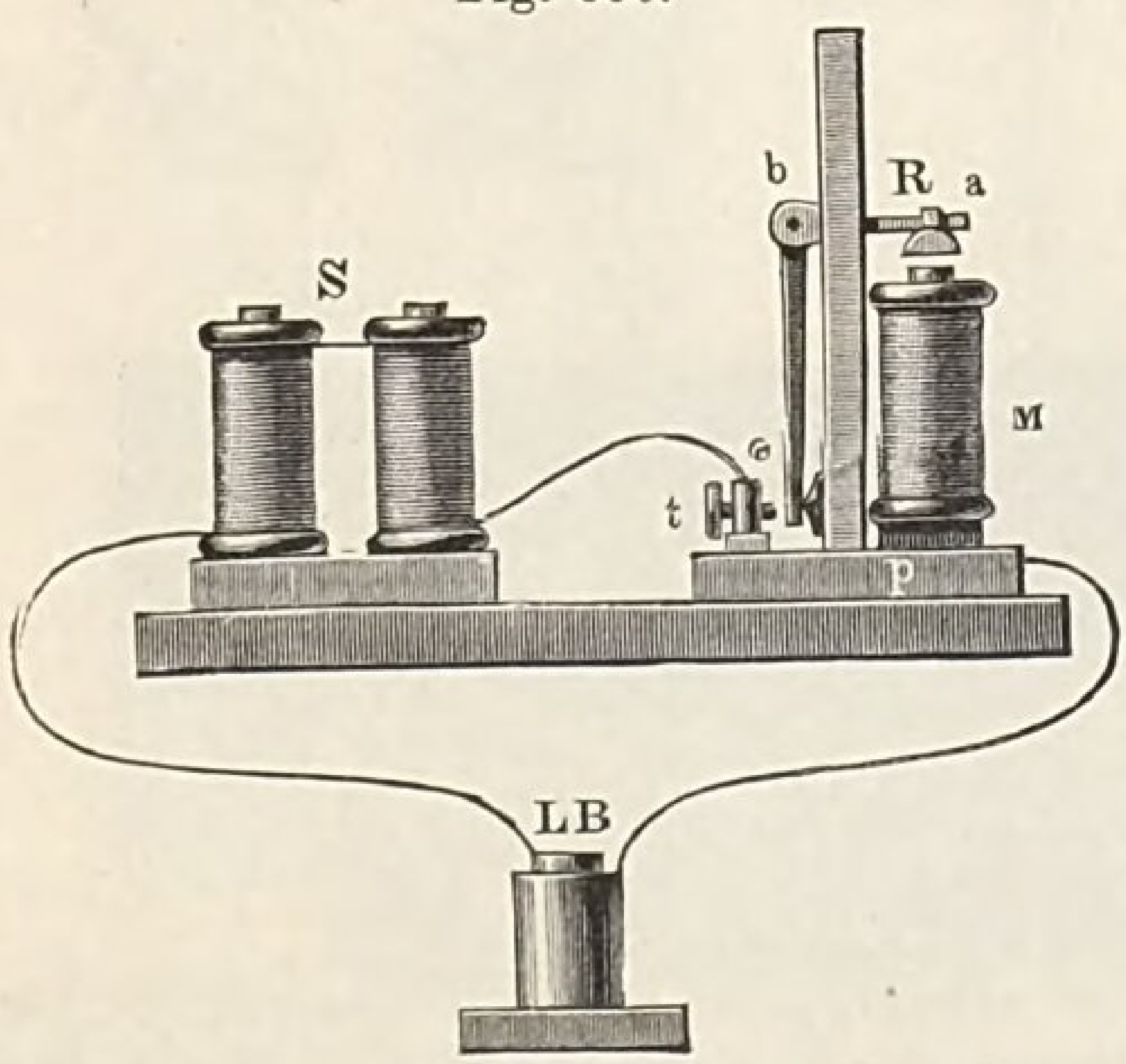
so lange Drahtleitung zu senden, müsste man eine übermässig starke Batterie anwenden. Um mit mässigen Batterien auszureichen, hat man folgende sinnreiche Einrichtung getroffen.

An jeder Station befinden sich zwei Batterien. Die eine, welche den Namen der Linienbatterie führt, besteht für eine Entfernung von ungefähr 10 Meilen aus sechs Zinkkohlenbechern oder meist einer grösseren Zahl schwächerer Elemente. Diese Batterie ist es, welche ihren Strom zur nächsten Station sendet und dort auf einen ausserordentlich leicht beweglichen Apparat wirkt, welcher der Uebertrager oder auch das Relais genannt wird.

Ein solcher Uebertrager ist in Fig. 550 sammt seiner Combination mit dem Schreibapparat schematisch dargestellt.

Der Elektromagnet *M* hat im Wesentlichen dieselbe Einrichtung wie der am Schreibapparat Fig. 547, nur sind die Spiralen (von denen in unserer Figur nur eine sichtbar ist) aus dünnerem Drahte gebildet und haben mehr Windungen. Der unten flache Anker steht dem Eisenkerne ziemlich nahe; er ist an einem rechtwinkelig gebogenen eisernen Winkelhebel *abc* befestigt, dessen Drehungsaxe durch ein messingenes Gestell getragen wird. Dieser Winkelhebel nun wird durch eine in unserer Figur nicht sichtbare Feder in die Höhe gezogen, und dadurch sein unteres Ende *c* nach rechts gegen die Spitze eines am Stativ befestigten Schraubenkopfes angedrückt. Sobald ein Strom die Spirale durchläuft, wird der Anker niedergezogen und das untere Ende *c* des Hebels gegen die Schraube *t* gedrückt, noch ehe der Anker mit den Eisenkernen in Berührung kommt. Der Spielraum für den Hebel ist sehr klein; da nun ferner der Hebel sehr leicht beweglich ist, und der Anker den Eisenkernen sehr nahe steht, so reicht schon ein sehr schwacher, die Spirale durchlaufender Strom hin, um diese Bewegung hervorzubringen.

Fig. 550.



Nun befindet sich aber an jeder Station eine zweite Säule, die Localbatterie, aus einer geringen Anzahl von Bechern bestehend, in deren Schliessungsbogen der Schreibapparat eingeschaltet ist; die eben besprochene Bewegung des Winkelhebels dient nur dazu, diese Kette zu schliessen und wieder zu öffnen.

Von dem einen Pole, etwa dem positiven der Localbatterie, geht nämlich ein Draht zur Messingplatte *p*, mit welcher der Winkelhebel

in leitender Verbindung steht. Der kleine Messingpfeiler aber, in welchem die Schraube *t* steckt und welcher durch eine Unterlage von Elfenbein oder Holz vor der leitenden Berührung mit *p* geschützt wird, ist durch einen Leitungsdraht mit dem einen Drahtende der Spirale des Schreibapparates verbunden, von deren anderem Ende ein Draht zum negativen Pole der Localbatterie führt. Man sieht also, dass die Localbatterie nicht geschlossen ist, so lange kein Strom durch die Spiralen des Uebertragers geht, weil sich eine Unterbrechungsstelle zwischen der mit dem negativen Pol verbundenen Schraube *t* und dem mit dem positiven Pole verbundenen Winkelhebel befindet. Sobald aber die Spiralen des Uebertragers durch den von der anderen Station kommenden Strom durchlaufen werden, findet die Schliessung der Kette bei *c* statt, und nun wird auch der Schreibapparat von dem Strome der Localbatterie durchflossen, der natürlich sehr kräftig ist, weil er ausser den Windungen der Spiralen bei *S* nur eine ganz unbedeutende Drahtlänge zu durchlaufen hat.

Die Bedeutung der Fig. 549 wird nun durch Einführung des Uebertragers eine etwas andere; *m* und *m'* stellen nämlich nicht, wie anfangs angenommen wurde, die Elektromagnete der Schreibapparate an beiden Stationen, sondern die Elektromagnete der beiden Uebertrager dar.

Sobald der Telegraphist einer Station den Schlüssel niederdrückt, wie es in Fig. 549 auf der Station rechts der Fall ist, so sendet er den Strom seiner Hauptbatterie durch die Spirale des Uebertragers auf der Empfangsstation; dadurch wird die dortige Localbatterie geschlossen und der Anker des Schreibapparates in Thätigkeit gesetzt.

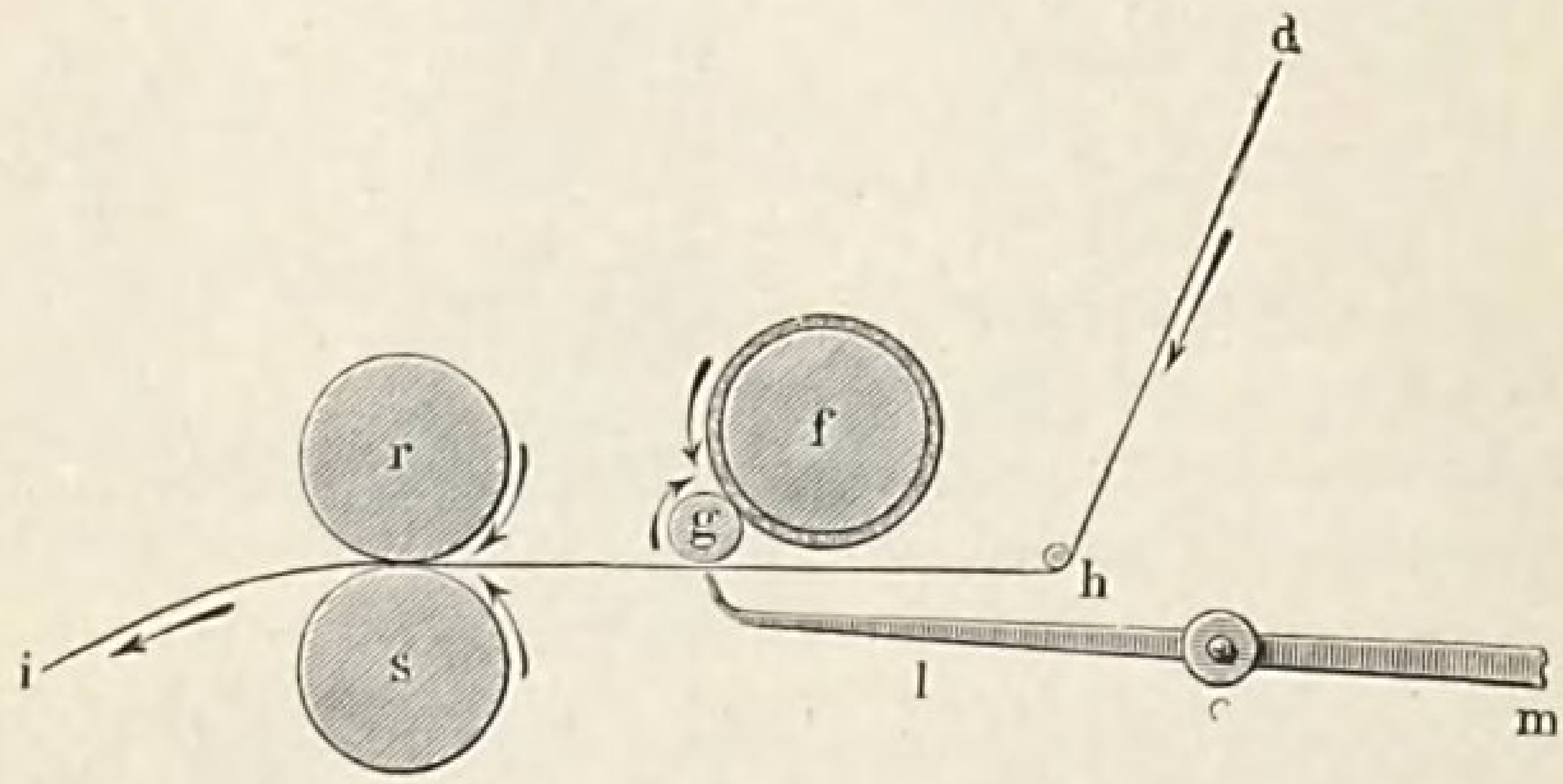
Eine Verbesserung des Morse'schen Apparates ist der sogenannte Schwarzschreiber. Die Schrift des Morse'schen Schreibhebels markirt sich durch Vertiefungen im Papier, welche nur bei guter Beleuchtung gesehen werden und deshalb mühsam zu lesen sind. Dazu kommt noch, dass eine bedeutende Kraft der Localbatterie dazu gehört, um die Eindrücke des Stiftes hinlänglich zu markiren. Um diese Uebelstände zu beseitigen, wurden viele vergebliche Versuche gemacht, bis die Aufgabe endlich durch den Schwarzschreiber gelöst wurde, dessen Einrichtung aus der schematischen Fig. 551 (a. f. S.) zu ersehen ist. Der Papierstreifen *dhi* wird wie beim Morse'schen Apparat durch die beiden mit gleichförmiger Geschwindigkeit sich umdrehenden Metallcylinder *r* und *s* fortgezogen. *f* ist eine um ihre Axe drehbare Walze, deren aus Tuch oder Filz bestehender Ueberzug mit öliger Tinte getränkt ist. Dieser Filzcylinder berührt die gleichfalls um ihre Axe drehbare Metallscheibe *g* und befeuchtet sie an ihrem äusseren Rande mit der Farbe. Wenn der Elektromagnet nicht in Thätigkeit ist, bewegt sich der Papierstreifen dicht unter der Scheibe *g* fort, ohne sie zu berühren, sobald aber der Strom des Elektromagnets geschlossen wird, wird der Papierstreifen durch die Spitze des um *c* dreh-

baren Schreibhebels *lm* an den Rand des Rädchens *g* angedrückt und ein Punkt oder ein Strich gemacht, je nachdem die Schliessung des Stromes nur momentan ist oder einige Zeit dauert. Eine Drehung von *g* und *f* erfolgt nur, so lange der Papierstreifen durch den Schreibhebel an den Umfang des Rädchens *g* angedrückt ist.

Dieser Apparat bietet ausser dem Vortheil einer ungleich leserlicheren Schrift auch noch den Vortheil, dass die Bewegung des Schreibhebels hier nur eines geringen Kraftaufwandes bedarf, so dass man auf nicht zu grosse Entfernungen hin das Relais und die Localbatterie ganz entbehren kann.

Seit einigen Jahren ist dem Morse'schen Schreibtelegraphen in dem Drucktelegraphen von Hughes eine ernste Concurrenz erwachsen. Der letztere hat einen Manipulator in Form einer Klaviatur und einen sehr complicirt gebauten Receptor, dessen Hauptbestandtheil ein Rad ist, dessen Umfang die Buchstabentypen enthält. Der Mechanismus wirkt derartig, dass beim Niederdrücken einer Taste am Auf-

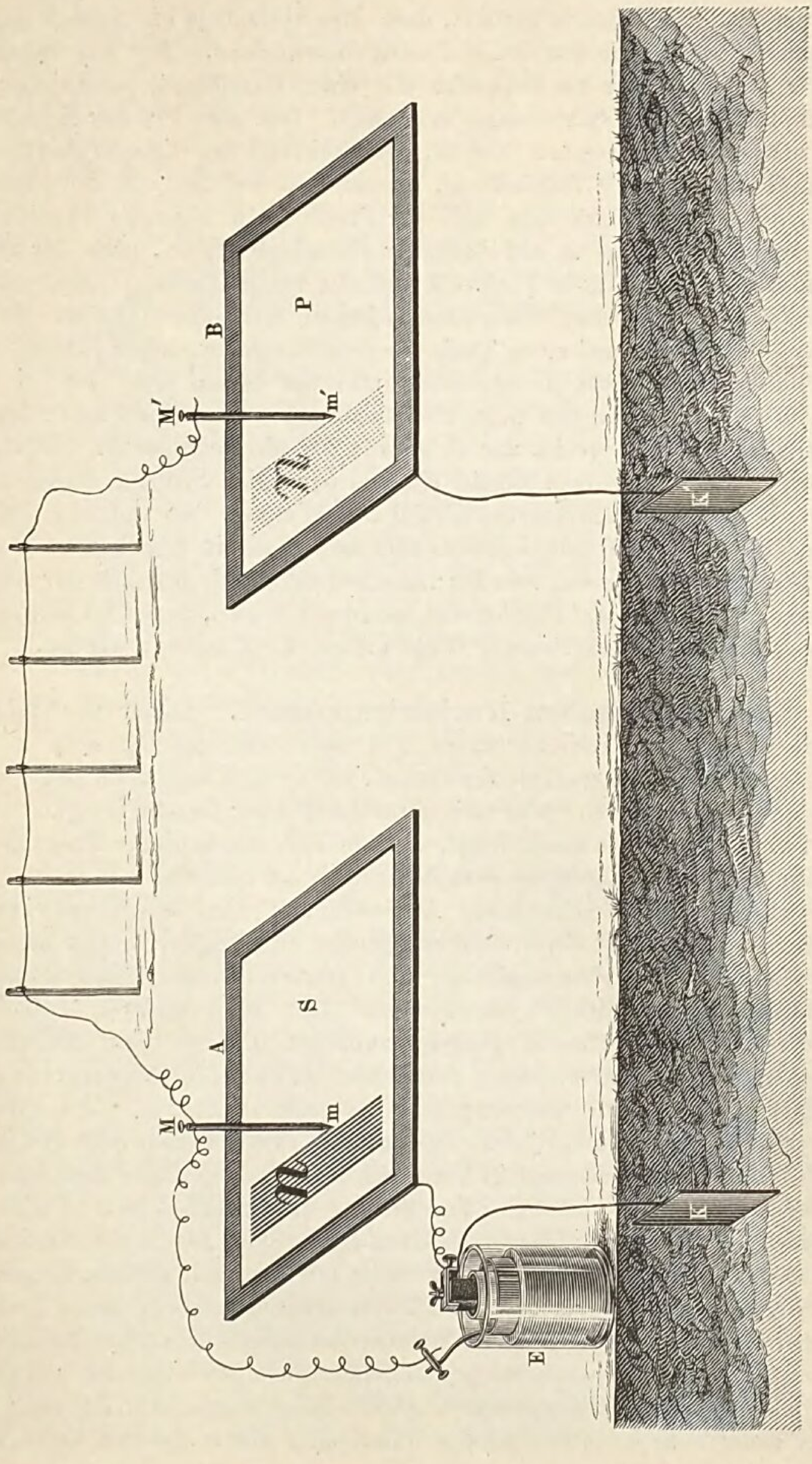
Fig. 551.



gabeorte das Typenrad der Empfangsstation sich so lange dreht, bis der gewünschte Buchstabe zu unterst zu stehen kommt, worauf der Papierstreifen an die geschwärzte Type angedrückt wird. Die Depesche erscheint daher in gewöhnlichen lateinischen Lettern gedruckt.

Caselli's Pantelegraph ist auf ganz abweichenden Principien beruhend. Wenn man auf eine Metallplatte, welche mit einem Pole einer Batterie verbunden ist, ein mit Blutlaugensalzlösung getränktes Papierblatt legt, und mit einem Metallstifte, der mit dem anderen Pole verbunden ist, darauf Linien zieht, so erscheinen dieselben in blauer Farbe, weil das Blutlaugensalz unter Bildung von Berlinerblau durch den Strom zersetzt wird. Wird während des Linienziehens der Strom unterbrochen, so bleibt die Färbung aus. Man denke sich nun, wie in der schematischen Zeichnung Fig. 552 dargestellt ist, die beiden Metallplatten *A* und *B*, erstere an der Aufgabe-, letztere an der Empfangsstation aufgestellt. Die Platte *A* ist mit einem Stanniolblatte *S*, die Platte *B* mit einem in Blutlaugensalzlösung getränkten Papierblatte *P* bedeckt. Die beiden Metallstifte *M* und *M'* werden mittelst eines (in

Fig. 552.



der Zeichnung nicht angedeuteten) Mechanismus durchaus gleichzeitig derart über die Flächen geführt, dass ihre Spitzen je ein System eng an einander stossender paralleler Linien beschreiben. Auf das Stanniolblatt *S* wird zuvor die Depesche mit einer Harzlösung geschrieben, so dass nichtleitende Schriftzüge entstehen. Der eine Pol der Batterie *E* ist zuerst mit dem ersten Stift *M*, dann mittelst der Telegraphenleitung mit *M'* in leitender Verbindung, der andere Pol ist mit der Platte *A* und mittelst der Erdleitung mit der Platte *B* in leitender Verbindung. So lange die Spitze *m* auf leitender Unterlage gleitet, geht der Strom von *E* über *M*, *m* nach *E* zurück und die übrige Leitung erhält wegen des sehr viel grösseren Widerstandes keinen merklichen Strom. So oft aber die Spitze *m* auf einen Theil der Schriftzüge zu stehen kommt, wird daselbst die Leitung unterbrochen und der Strom geht von *E* über *M*, *M'*, *m'*, *K'*, *K* zurück nach *E*. Dabei muss in *m'* eine blaue Färbung entstehen. Man begreift, wie es auf diese Weise möglich ist, von irgend welcher Zeichnung oder Schrift ein aus parallelen Strichen bestehendes, also so zu sagen schraffirtes Abbild zu erhalten. So weit das Princip der Methode; ihre technische Ausführung muss in Specialwerken über Telegraphie nachgelesen werden; hier begnügen wir uns mit der Andeutung, dass die beiden Stifte durch isochrone Pendel, deren Uebereinstimmung selbst auf elektrischem Wege erzielt wird, bewegt werden.

187 **Die elektrischen Registrirapparate.** Ausser zur Telegraphie wird der elektrische Strom und der Elektromagnet noch zu unzähligen anderen Zwecken verwendet, wo es sich darum handelt, sei es auf grosse Distanzen, oder mit augenblicklicher Geschwindigkeit, oder auf vielfach gekrümmtem Wege, welcher eine mechanische Transmission nicht zulässt, Bewegungen auszulösen oder zu hemmen.

Unter diesen zahlreichen Anwendungen sind die elektrischen Registrirapparate von hervorragender Wichtigkeit nicht bloss bei physikalischen, meteorologischen und astronomischen Untersuchungen, sondern auch in der Physiologie und fast allen anderen messenden Wissenschaften. Hierher gehören zunächst die von dem Amerikaner Locke zuerst in Anwendung gebrachten galvanisch registrirenden Uhren, welche für astronomische Beobachtungen von dem grössten Werthe sind. Wird bei jedem Schlage des Pendels einer astronomischen Uhr die Kette geschlossen, in deren Schliessungsbogen eine dem Morse'schen Telegraphen ähnliche Vorrichtung eingeschaltet ist, so wird der Stift bei jedem Secundenschlage einen Punkt oder (wenn die Schliessung etwas längere Zeit dauert) einen Strich auf dem mit gleichmässiger Geschwindigkeit vorwärts bewegten Papierstreifen machen. Beim Locke'schen Apparate ging der Papierstreifen mit einer solchen Geschwindigkeit voran, dass die Secundenpunkte ungefähr 3 cm von einander abstanden.

Neben dem Elektromagnet dieses Schreibapparates ist aber noch ein zweiter angebracht, dessen Windungen einer anderen Kette ange-

hören, welche der Beobachter beliebig schliessen kann, indem er mit dem Finger eine Taste anschlägt. Durch die Schliessung dieser zweiten Kette wird nun gleichfalls ein Stift gegen den Papierstreifen gedrückt; bei wiederholtem Anschlagen entsteht so auf dem Papierstreifen neben der ersten Reihe von Punkten, den Secundenpunkten, eine zweite, welche wir Beobachtungspunkte nennen wollen.

Ist nun z. B. eine Sonnenfinsterniss zu beobachten, also genau der Moment anzugeben, in welchem der Mondrand an die Sonne tritt, so schaut der Beobachter durch das Fernrohr und hält den Finger an die Taste, welche er niederdrückt, sobald er die fragliche Erscheinung wahrnimmt. Auf diese Weise wird der Beobachtungsmoment auf dem Papierstreifen markirt.

Steht der Beobachtungspunkt neben dem Secundenpunkte, so trifft der Beobachtungsmoment mit dem Beginn einer Secunde zusammen und der Anfang der Finsterniss tritt um so viel Uhr, Minuten und Secunden ein. Steht der Beobachtungspunkt nicht genau neben einem, sondern zwischen zwei Secundenpunkten, so kann man mit dem Zirkel die Entfernung des Beobachtungspunktes von dem vorhergehenden Secundenpunkte auf dem Papierstreifen abmessen und danach (mittelst einer Scala) bestimmen, wie viel Zehntel und, wenn man will, Hundertel einer Secunde noch zu der nächst vorhergehenden Secunde hinzukommen. So ist es möglich, den Zeitpunkt einer Beobachtung bis auf Hundertel-Secunden genau zu ermitteln.

Diese grosse Genauigkeit der Ablesung ist ein wesentlicher Vorzug der galvanisch registrirenden Uhren.

Bisher musste man die Uhr immer neben sich haben, um die Secunden zu hören, und konnte eine Beobachtung nicht gerade in der unmittelbaren Nähe der Uhr gemacht werden, so war dies, selbst wo alle Hülfsmittel gegeben waren, eine sehr umständliche Sache; bei einer registrirenden Uhr dagegen ist es ganz gleichgültig, wo sie steht, da man die Drahtleitung leicht durch alle Zimmer einer Sternwarte führen kann; es ist nicht einmal erforderlich, dass die astronomische Uhr im Beobachtungssaale selbst ihren Platz habe, vielmehr erscheint es zweckmässiger, sie in einem Wohnzimmer oder Büreau — natürlich an einem isolirten Pfeiler — aufzustellen, wo sie keiner grossen Temperaturveränderung ausgesetzt ist und einen gleichmässigen Gang einhalten kann.

Eine registrirende Uhr lässt sich ferner noch mit dem elektrischen Telegraphen in Verbindung bringen und zu mannigfaltigen Zwecken benutzen. Dieselbe Uhr kann z. B. einen Registrirapparat an der Münchener und einen an der Wiener Sternwarte haben, und wenn an beiden Orten der Durchgang derselben Sterne durch den Meridian beobachtet wird, so lässt sich daraus mit einer bisher nie erreichten Sicherheit die geographische Längendifferenz ableiten.

Um zu bewirken, dass der Strom bei jedem Pendelschlage der Normaluhr auf kurze Zeit geschlossen wird, hat man verschiedene Vorrich-

tungen construirt, von denen die in Fig. 553 dargestellte, unseres Wissens von Lamont herrührende, wohl die einfachste sein dürfte. An dem unteren Ende des ganz metallischen Pendels ist ein vertical herabreichendes Platinblättchen *p* eingesetzt, welches bei jedem Pendelschlage, und zwar gerade in dem Momente, in welchem das Pendel seine Gleichgewichtslage passirt, die Quecksilberkuppe *q* durchschneidet. Diese Quecksilberkuppe bildet die obere Grenze einer Quecksilbersäule, welche sich in dem aus Glas oder Elfenbein gebildeten Quecksilbernäpfchen *s* befindet und in welche von unten her der kupferne Leitungsdraht *r* hineinragt.

Durch ein communicirendes Gefäss (in der Figur nicht sichtbar), in welchem eine grössere Quecksilbermenge im Niveau von *q* enthalten ist, wird dafür gesorgt, dass das bei *q* durch das Pendel weggestreifte Quecksilber sofort erneuert wird. Jener Strom, welcher die Secundenpunkte zu markiren hat, wird nun über *r*, *s*, *q* in das Pendel und von dort weiter zum Elektromagneten geleitet. Offenbar wird er jedesmal auf einen Moment geschlossen, so oft das Pendelende *p* die Quecksilberkuppe *q* passirt.

Fig. 553.

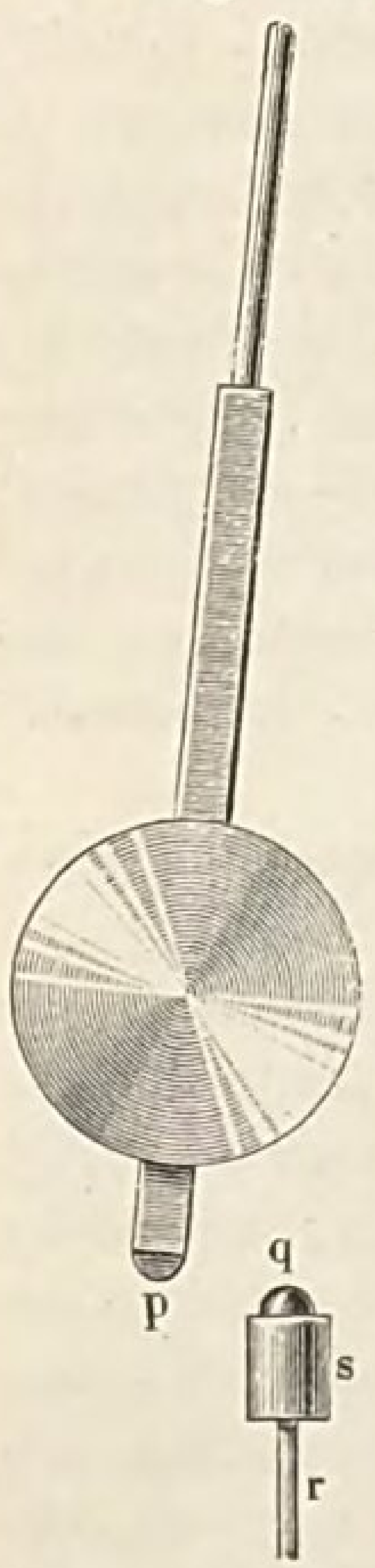
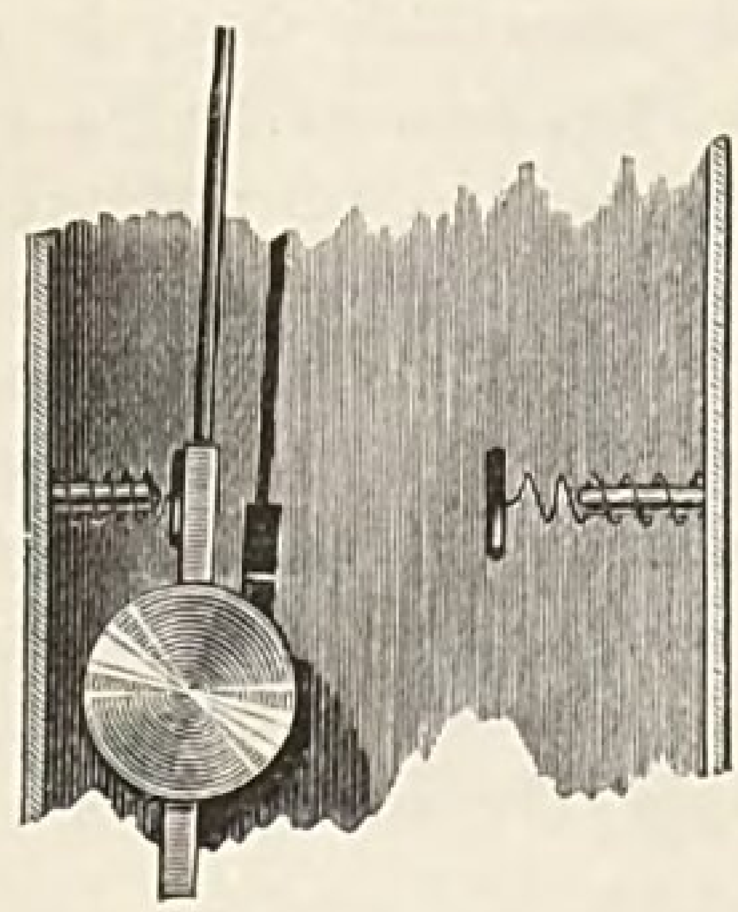


Fig. 554.



Eine andere, aber weniger genau arbeitende, von Buff herrührende Vorrichtung, um den Strom mit jedem Pendelschlage der Uhr zu schliessen, ist Fig. 554 dargestellt. An jeder Seite des Uhrkastens ist etwas über der Höhe der Pendellinse eine schwache Spiralfeder von Metalldraht angebracht, deren Axe horizontal steht, und welche an dem nach innen gekehrten Ende eine kleine Metallplatte trägt. Jede dieser beiden Spiralen ist nun mit dem einen, etwa dem positiven Pol der elektromotorischen Batterie in leitende Verbindung gesetzt. Wenn nun das metallische Pendel an dem einen Ende seiner Bahn ankommt, so kommt es mit dem entsprechenden Metallblättchen in Berührung, und zwar wird dabei die Spiralfeder etwas comprimirt, damit ein hinlänglicher Contact zwischen dem Metallblättchen und der Pendelstange stattfindet, wie dies auf der linken Seite unserer Figur dargestellt ist. Von der comprimirten Spiralfeder geht nun der Strom durch das metallische Pendel zu dem messingenen Gestelle der Uhr, um endlich von diesem durch die Windungen des Elektromagnets zum anderen Pole des Elektromotors zurückzukehren.

Wenn nun das Pendel von der in Fig. 554 dargestellten Lage zurückgeht, so wird der Strom alsbald unterbrochen, um erst wieder her-

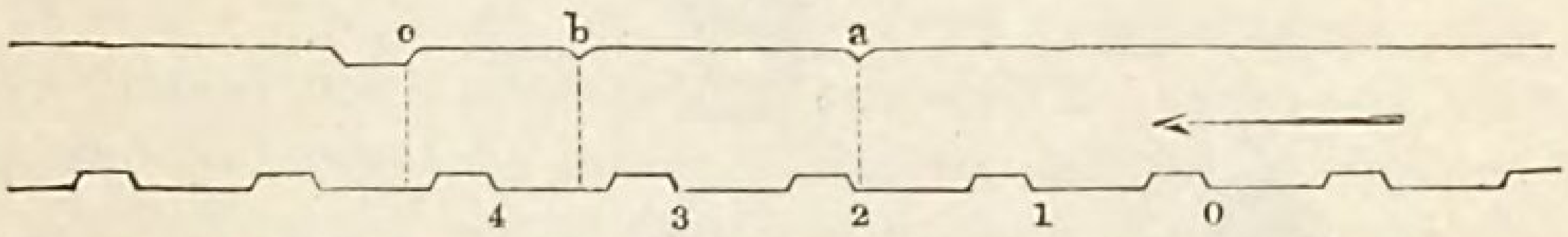
gestellt zu werden, wenn das Pendel am anderen Endpunkte seiner Bahn angekommen ist.

Der eigentliche Registrirapparat wurde später durch Anwendung von Schwarzschreibern wesentlich vervollkommnet. Hasler in Bern construirt dieselben in folgender Weise. Der 22 mm breite Papierstreifen wird mit gleichförmiger Geschwindigkeit über einer ebenen horizontalen Metallplatte hingezogen; auf diesem Papierstreifen laufen beständig die Rädchen zweier Schwarzschreiber so, dass, wenn die Elektromagnete ganz ausser Thätigkeit blieben, zwei parallele, ungefähr 8 mm von einander abstehende Linien gezogen würden.

Jeder der beiden Schwarzschreiber ist nun mit einem Elektromagneten verbunden, durch dessen Schliessung er in horizontaler Richtung etwas gegen den anderen Schwarzschreiber hin verschoben wird.

Der eine Elektromagnet wird mit jedem Pendelschlage der Uhr auf kurze Zeit geschlossen und so die Secunden in der Weise markirt, wie

Fig. 555.



es die untere Linie der Fig. 555 darstellt, welche die Copie eines mit einem solchen Apparate beschriebenen Papierstreifens ist. Man ersieht aus dieser Figur, dass der Papierstreifen in jeder Secunde ungefähr 10,75 mm fortgezogen wird und dass der von der Uhr kommende Strom in jeder Secunde auf die Dauer von ungefähr 0,4 Secunden geschlossen bleibt.

Die Beobachtungsmomente werden nun auf der oberen Linie markirt und zwar, wie man bei *a* und *b* sieht, wenn die Schliessung nur ganz kurz, oder, wie man bei *c* sieht, wenn die Schliessung etwas länger dauert.

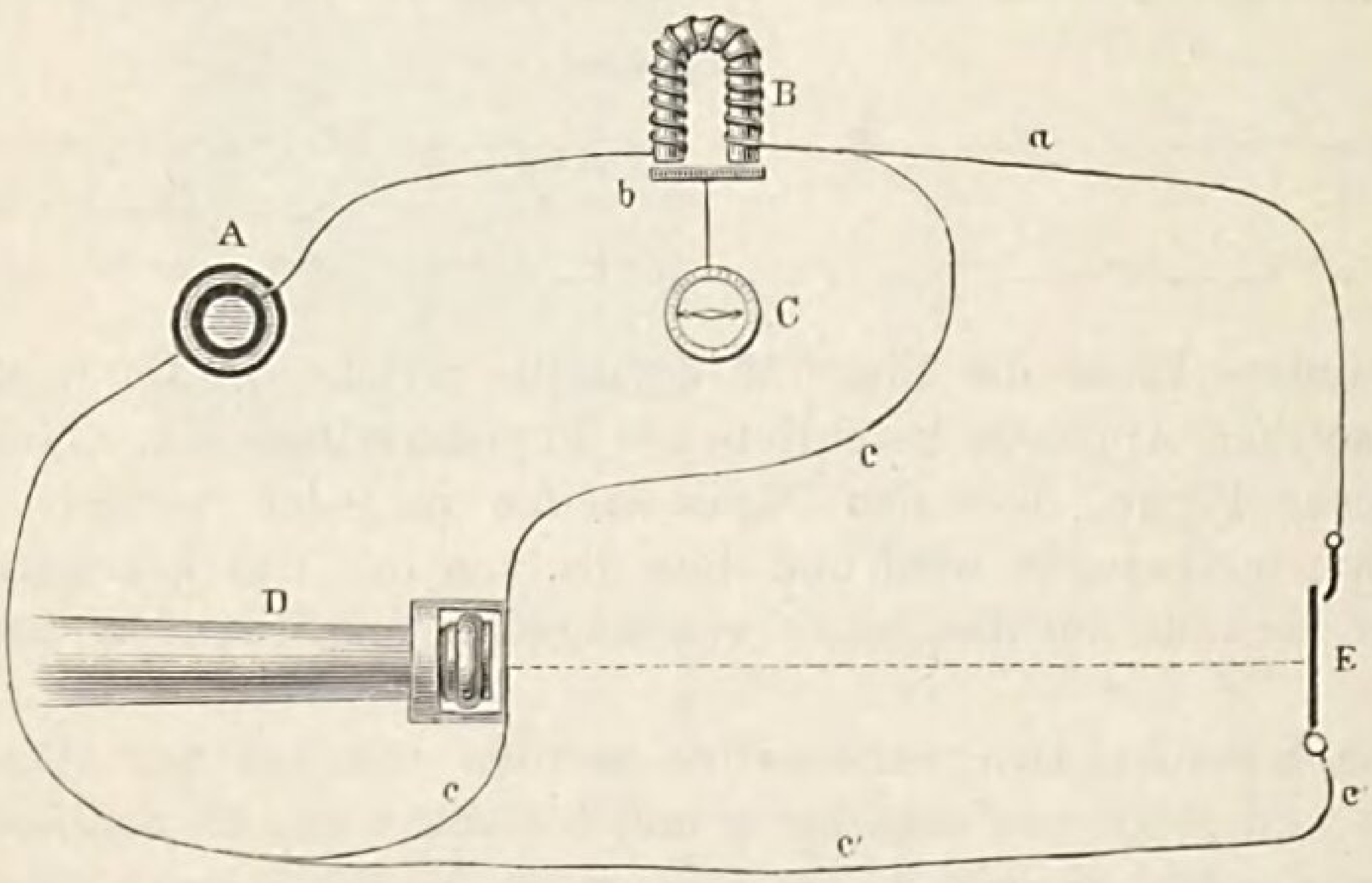
Lamont hat den Papierstreifen durch eine mit Russ geschwärzte Metalltrommel ersetzt, welche durch ein Uhrwerk mit gleichförmiger Geschwindigkeit um ihre horizontale, auf beiden Seiten der Walze vorragende stählerne Axe gedreht wird. Die eine Hälfte dieser Axe ist nun (ähnlich wie bei dem Phonautograph von König, Bd. I, S. 718 und 813) mit einem Schraubengewinde versehen, so dass beim Umdrehen der Walze auch ein gleichförmiges Fortschieben derselben in der Richtung ihrer Längenaxe stattfindet; die Secundenpunkte, welche durch einen in Folge der Schliessung der Kette an die Walze angedrückten Stift hervorgebracht werden, bilden demnach auf derselben eine flache Spirale.

Die Beobachtungspunkte werden durch einen dicht neben dem ersteren angebrachten Stift markirt*).

*) Lamont's Beschreibung der an der Münchener Sternwarte verwendeten neuen Instrumente und Apparate. München 1851.

188 **Das elektrische Chronoskop.** Während die im vorigen Paragraphen beschriebenen Registrirapparate dazu dienen, einen absoluten Zeitmoment zu notiren, sind die hier zu beschreibenden dazu bestimmt, kleine Zeitunterschiede oder Zeiträume zu messen. Wheatstone benutzte zuerst zu diesem Zwecke den elektrischen Strom; seine nächste Absicht war, die Zeit zu messen, welche Geschützkugeln zum Durchlaufen beliebiger Strecken ihrer Bahn brauchen. Seine Einrichtung zeigt die schematische Fig. 556. *A* ist die elektrische Batterie; einer ihrer Pole ist mit dem Elektromagnet *B* verbunden; ist der Strom geschlossen und also der Anker des Magnets angezogen, so steht die Uhr *C* still; verliert aber der Magnet seine Kraft, so zieht eine Feder den Anker *b* ab und dadurch wird das Uhrwerk *C* ausgelöst und läuft so lange, bis der Strom wieder geschlossen wird. Dieses Oeffnen und Schliessen der

Fig. 556.



Kette bewirkt die Kugel auf folgende Weise: Um die Mündung des Geschützes *D* ist ein Holzring gelegt, über welchen der Draht *c* gespannt ist, welcher einerseits zum Elektromagnet *B*, andererseits zum Elektromotor *A* führt; diese Verbindung wird durch die aus dem Rohre tretende Kugel zerrissen, die Kette geöffnet und so die Uhr in Bewegung gesetzt. Ein zweiter Draht *c'* ist mit einem in beliebiger Entfernung aufgestellten Ziele *E* verbunden, welches so eingerichtet ist, dass die geringste Bewegung, welche ihm mitgetheilt wird, eine kleine Metallfeder in dauernde Berührung mit einem Metallstücke bringt, welches durch den Draht *a* mit demselben Pole des Magnets verbunden ist wie der Draht *c*. Berührt nun die Kugel das Ziel, so wird dadurch die Kette abermals geschlossen, der Anker angezogen und das Uhrwerk gestellt. Der Zeiger giebt nun die von der Kugel verwendete Zeit an.

Das Chronoskop *C* muss natürlich so eingerichtet sein, dass es noch sehr kleine Unterabtheilungen einer Secunde geben kann.

Wheatstone fand eine bedeutende Fehlerquelle darin, dass der Anker (der wie beim Morse'schen Telegraph ohnehin nicht ganz in Berührung mit den Polen des Elektromagnets kommen darf) nicht rasch genug vom Elektromagneten abfiel und ebenso nicht rasch genug angezogen wurde; aus diesem Grunde hielt Wheatstone selbst seine Messungen nur bis auf $^1/_{60}$ Secunde genau.

In Wheatstone's Chronoskop erkannte Hipp als Hauptfehler den Umstand, dass das Uhrwerk erst beim Beginne der zu messenden kleinen Zeit in Gang gesetzt wird, wobei nothwendig eine grössere, jedoch für alle Versuche etwa gleiche Zeit verstreicht, bis das Werk in gleichförmigen Gang gekommen ist, eine Zeit, die in manchen Fällen selbst grösser sein wird, als die zu messende.

Hipp änderte nun den Apparat dahin ab, dass er den Elektromagnet nicht dazu verwandte, das Uhrwerk auszulösen und zu stellen, sondern nur dazu, die Verbindung des Zeigers mit dem schon im Gang befindlichen Uhrwerk herzustellen und zu unterbrechen.

Werner Siemens hat schon 1845 vorgeschlagen, die Fehlerquellen, welche den Verfahrungsweisen von Wheatstone, Breguet, Hipp und Anderen noch immer anklebten, dadurch zu vermeiden, dass man die Zeitmarken direct durch elektrische Funken auf die polirte Oberfläche eines rasch rotirenden Cylinders einbrennen lässt. Diese Idee, welche im Wesentlichen auch einer weiter unten mitgetheilten von v. Babo ausgeführten Methode zu Grunde liegt, hat W. Siemens vor einigen Jahren mit Erfolg benutzt, um die Geschwindigkeit der Geschosse innerhalb des Rohres des Geschützes zu messen. Der rotirende Cylinder drehte sich genau 100 mal in der Secunde und gab bei jeder Secunde einen Schlag auf ein Glöckchen, welcher mit dem eines Secundenpendels übereinstimmen musste. Der Mantelfläche gegenüber befand sich sehr nahe eine Metallspitze, welche mit den äusseren Belegungen einer Reihe isolirter Leydener Flaschen in leitender Verbindung stand. Die innere Belegung jeder einzelnen Flasche war mit einem mit Guttapercha isolirten Draht in Verbindung, welcher, die Geschützrohrwandungen durchsetzend, in die Seele (den Hohlraum) des Geschützrohres hineinreichte. Beim Abfeuern des Geschützes berührt das Geschoss jeden dieser Drähte und stellt deren Ableitung zur Erde her. Da auch der rotirende Cylinder zur Erde abgeleitet ist, so entladen sich der Reihe nach die Flaschen und es entstehen eine Reihe von Funkenspuren auf der Mantelfläche. Durch Messung der Winkelabstände derselben erhält man dann leicht die Zeitdifferenzen und hieraus die Geschwindigkeiten des Geschosses an seinen verschiedenen Stellen im Rohr. Nach derselben Methode hat W. Siemens auch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des elektrischen Stromes in Eisendrähten gemessen und zu 240 000 km (31 000 geographische Meilen) gefunden.

Bei Messungen dieser Art bildet die Herstellung einer gleichförmigen Rotationsgeschwindigkeit und die Bestimmung derselben Schwierigkeiten.

H. v. Helmholtz hat diese bei seinem zu physiologischen Versuchen bestimmten Myographion dadurch umgangen, dass er dem rotirenden Cylinder eine allmälig steigende Geschwindigkeit ertheilte und die Messung in dem Momente einleitete, in welchem eine bestimmte Rotationsgeschwindigkeit erreicht wurde. In diesem Moment wird nämlich eine mitrotirende, durch Federkraft gegen die Rotationsaxe gedrückte Masse durch die Centrifugalkraft nach aussen geschleudert, und diese Bewegung dann zur Auslösung derjenigen Bewegungen benutzt, deren Dauer und Verlauf auf dem berussten Cylinder verzeichnet werden soll. Ausser von v. Helmholtz sind noch von anderen Physiologen solche Myographions construirt worden; so z. B. das von Valentin, welcher statt des Cylinders eine rotirende Scheibe anwendete, das von Thiry, welcher wie Foucault das Uhrwerk durch eine Sirene ersetzte, das Fallmyographion von Harless und Jendrássik, das Pendelmyographion von Fick, welches v. Helmholtz später verbessert hat und das Federmyographion von Du Bois Reymond, über welche Apparate man in physiologischen Werken nähere Mittheilungen findet. Uebrigens dienen diese Apparate nicht allein zur Messung kleiner Zeiträume, sondern insbesondere auch zur graphischen Aufnahme von allerlei zeitlich verlaufenden Veränderungen und Bewegungen. Die Schwierigkeiten der Herstellung einer bestimmten oder constanten Rotationsgeschwindigkeit des berussten Cylinders entfallen gänzlich durch Anwendung der Stimmgabel beim Vibrations-Chronoskop von v. Babo. Offenbar lässt sich nämlich die in Band I, §. 204 beschriebene Methode zur Messung der Schwingungszahl einer Stimmgabel umgekehrt benutzen, um kleine Zeiträume zu messen. Man hat nur nöthig, auf der berussten Trommel neben einander zwei Schreibspitzen schreiben zu lassen, von denen die eine beim Beginn und beim Ende des zu messenden Zeitraumes als Zeitmarken rasche Seitenzuckungen in Folge elektromagnetischer Einwirkung ausführt, während die zweite Spitze die Schwingungen einer Stimmgabel bekannter Schwingungszahl aufzeichnet. Ist diese Schwingungszahl $= n$ (per Secunde) und liegen m ganze Hin- und Hergänge zwischen der ersten und zweiten Zeitmarke, so sind dieselben um $\frac{m}{n}$ Secunden von einander entfernt.

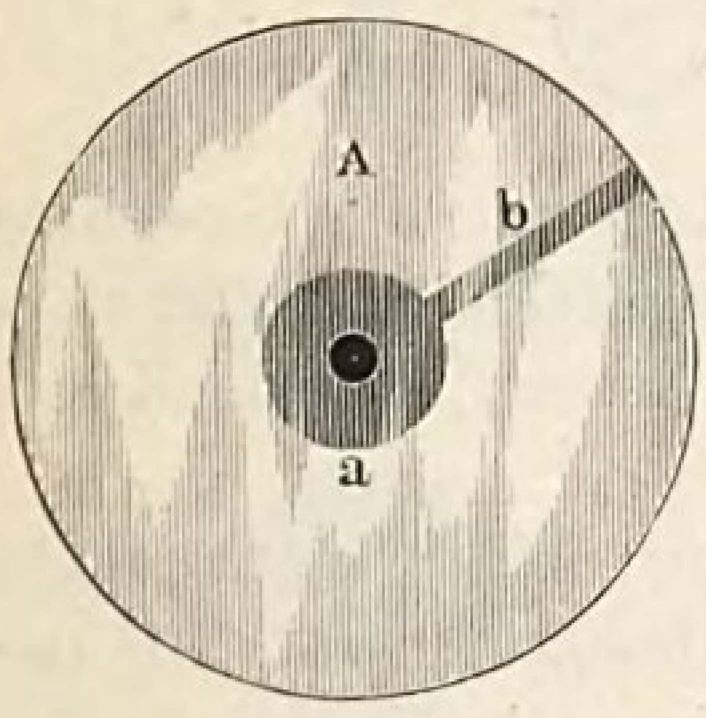
Noch einfacher und genauer wird das Verfahren, wenn man die Zeitmarken nicht durch eine eigene schreibende Spitze, sondern, wie oben bei Siemens' Methode, durch einen elektrischen Funken hervorbringen lässt, welcher durch dieselbe Spitze überschlägt, welche die Stimmgabelschwingungen aufzeichnet. Wir haben den zugehörigen Apparat bereits an der citirten Stelle des ersten Bandes beschrieben. Hier möge noch das Vibrations-Chronoskop von v. Beetz erwähnt werden, welches auf demselben Principe beruht, aber statt einer Cylinderfläche eine ebene Zeichenfläche aus verzinntem Eisenblech benutzt, welche mit roth gefärbtem Schellackfirniss überzogen und dann angerusst

ist. Die Schreibspitze der an einem Schlitten befestigten mit freier Hand längs einer Führung parallel der Schreibfläche abgezogenen Stimmgabel beschreibt dann eine rothe Curve, auf welcher die durch einen Inductionsfunken hervorgebrachten Zeitmarken als kleine weisse Punkte sichtbar sind *).

Auf ganz anderem Wege suchte Pouillet die Messung kleiner Zeiträume zu bewerkstelligen. Er ging nämlich von der Ansicht aus, dass die Grösse des durch einen vorübergehenden Strom bewirkten Ausschlages der Multiplicatornadel von der Stärke des Stromes und von der Zeit abhänge, während welcher derselbe auf die Nadel wirkt, wenn diese letztere überhaupt nur kurz ist. Man kann also aus dem unter verschiedenen Umständen erfolgenden Ausschlage auf die Zeit schliessen, wenn immer der gleich starke Strom angewendet wird und das Verhältniss zwischen Zeit und Ausschlag bekannt ist. Pouillet hat das letztere nicht theoretisch entwickelt, sondern durch Versuche auf folgende Weise eine Tabelle construirt.

Auf eine runde Glasplatte A, Fig. 557, von 84 cm Durchmesser, welche um ihre Axe gedreht werden konnte, wurde rund um die Axe herum ein ziemlich breiter kreisförmiger Stanniolstreifen a, von diesem aus aber ein gerader Streifen b als Halbmesser geklebt, der nur 1 mm Breite hatte. Von den beiden Drahtenden der Kette ruhte das eine federnd auf dem Stanniolring a, das andere auf der Platte; wird letztere gedreht, so schliesst sich die Kette so oft und so lange, als sich der Stanniolstreifen b unter der Feder befindet. Man kann nun aus der Umdrehungszeit der Glasscheibe und der Entfernung der zweiten Feder von der Axe die Zeitdauer der Schliessung leicht bestimmen; sie war bei Pouillet, wenn die zweite Feder nahe am Rande der Glasplatte auflag und diese in einer Secunde einmal umgedreht wurde, $^1/_{2250}$ Secunde.

Fig. 557



Für einen fünfmal breiteren Stanniolstreifen würde unter den gleichen Umständen die Schliessung $^1/_{450}$, für einen 10 mm breiten würde sie $^1/_{225}$ Secunde zu dauern haben.

Mit Hülfe solcher Scheiben muss nun ermittelt werden, wie gross an einem bestimmten Multiplicator der Ausschlag ist, wenn bei bestimmter Stromstärke und bestimmtem Widerstande der Strom auf die Dauer eines zu bestimmenden Bruchtheils einer Secunde geschlossen wird. Nehmen wir z. B. an, eine Schliessung von $^1/_{300}$ Secunde habe einen Ausschlag von 5^0, eine Schliessung von $^1/_{100}$ Secunde habe einen Aus-

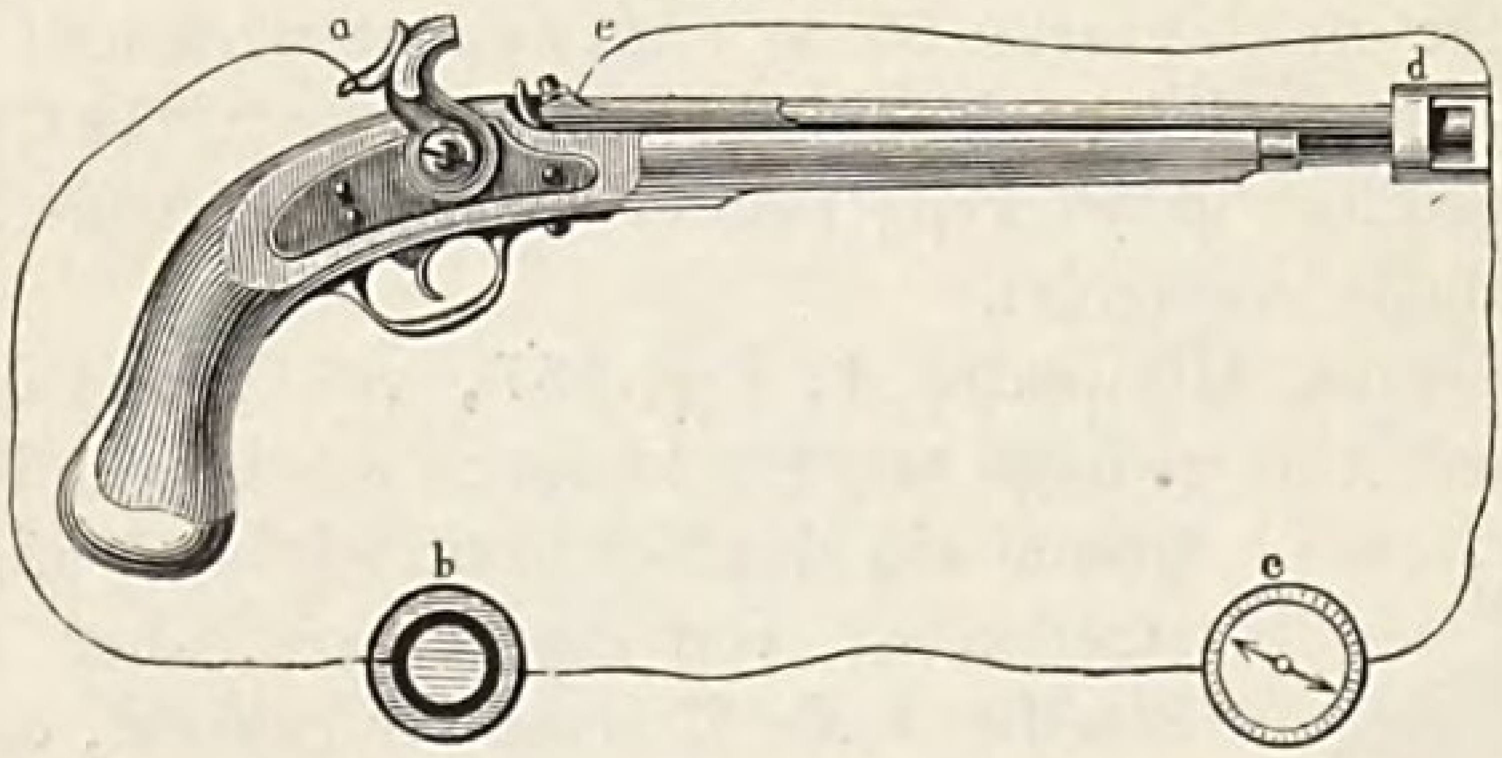
*) Pogg. Ann. **135**, S. 126; Edelmann's „Neuere Apparate" S. 31. Die elektrische Zeitmessungsmethode von E. Mach haben wir bereits Bd. I, S. 803 beschrieben.

schlag von 15⁰ gegeben, so kann man annehmen, dass bis zu 15⁰ der Ausschlag der Schliessungsdauer direct proportional ist.

Nach solchen vorbereitenden Versuchen wird man die Dauer einer auf andere Weise hervorgebrachten Schliessung berechnen können, welche von demselben Multiplicator bei gleicher Säule und gleichem Schliessungsbogen irgend eine Ablenkung zwischen 0⁰ und 15⁰ hervorbringt.

Pouillet hat nach diesem Princip Versuche über die Geschwindigkeit der Pulverentzündung gemacht, wobei er folgende Vorrichtung benutzte. Das Schloss eines Gewehres wurde vom Laufe isolirt, und der Hahn *a*, Fig. 558, mit dem einen Pol einer Volta'schen Batterie *b* verbunden. Von dem anderen Pole führte ein Draht zum Multiplicator *c*

Fig. 558



und von diesem über einen Holzring *d* vor der Mündung des Gewehres weg an das Zündhütchen *e*. Die Kette war also geschlossen von dem Augenblicke an, wo der Hahn aufschlug, bis zu jenem, wo die Kugel den Lauf verliess.

Nehmen wir z. B. an, er habe bei Anwendung obiger Instrumente gefunden, dass das Losschiessen der Pistole eine Ablenkung von 10⁰ bewirkt, so würde man daraus schliessen können, dass die Kugel $^1/_{15}$ Secunde braucht, um die Länge des Pistolenlaufes zu durchlaufen.

189 **Elektrische Uhren.** Zu den elektrischen Uhren im weitesten Sinne rechnet man drei verschiedene Apparate, nämlich das elektrische Pendel (mit oder ohne Zeigerwerk), das elektrische Zeigerwerk (ohne Pendel) und die elektrischen Uhrcorrectoren.

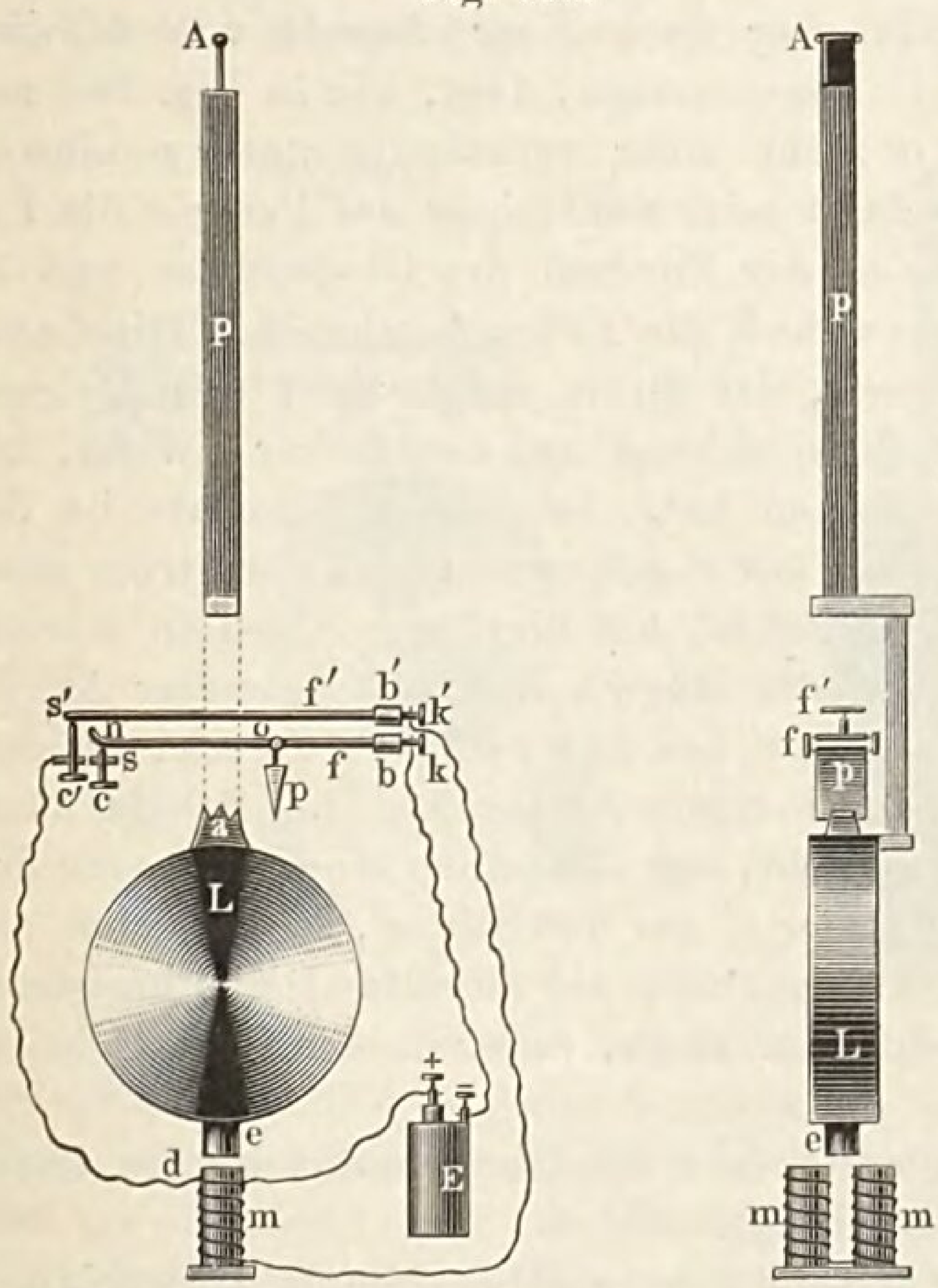
I. Das elektrische Pendel.

Bald nach Entdeckung der Zamboni'schen Säule hat man versucht, dieselbe zum Betriebe elektrischer Pendel und weiterhin von Uhren zu verwenden (siehe §. 109, Fig. 291, S. 363). Diese Versuche scheiterten an der Geringfügigkeit und Inconstanz der so erhaltenen Triebkraft und konnten erst nach der Erfindung der constanten Hydroketten und des Elektromagnetismus mit Erfolg wieder aufgenommen werden. Bei den elektrischen Pendeln wird durch elektromagnetische Anziehung entweder bei jedem Pendelschlage oder erst nach einer Reihe von Pendelschwingungen, sobald die Amplitude bis unter eine gewisse

Grenze abgenommen hat, dem Pendel ein neuer Impuls ertheilt, so dass es im Schwingen erhalten wird. Der erstere Weg wurde von Bain und Weare eingeschlagen, der letztere von Hipp u. A. Ausserdem sind noch Constructionen zur Ausführung gelangt, bei welchen der Antrieb des Pendels durch eine Feder oder einen Fallhebel, welche durch den Anker eines Elektromagnets ausgelöst werden, bewirkt wird (Systeme von Liais, Kramer, Geist, Arzberger u. A.).

Ist das elektrische Pendel selbst mit einem Zeigerwerk unmittelbar verbunden, so werden beide zusammen auch elektromagnetische Uhr genannt. Häufig dient das elektrische Pendel aber nur zum elektrischen

Fig. 559.



Betriebe abgesonderter Zeigerwerke. Wir wollen hier als Beispiel das elektrische Pendel von Hipp beschreiben. Die schematische Fig. 559 zeigt die wesentlichen Theile desselben. In dem Punkte A ist mittelst einer Stahlfeder die Pendelstange P, welche an ihrem unteren Ende die schwere Scheibe L und den Eisenanker e trägt, aufgehängt. Unterhalb dieses Ankers befindet sich der Elektromagnet m. Die Pendelstange ist in der halben Höhe gekröpft, wie aus der Seitenansicht zu ersehen ist. a ist ein aus Achat oder glashartem Stahl bestehendes auf die Pendellinse aufgesetztes Gleitstück, welches mehrere von vorn nach rückwärts verlaufende Furchen trägt. An den isolirten Metallstücken b und b' sind zwei horizontale Stahlfedern f und f' eingespannt, von denen die untere f für gewöhnlich an dem nichtleitenden Stifte s, die obere f' an dem leitenden Stifte s' anliegt. Die untere Feder ist an ihrem freien Ende mit einer nach aufwärts gerichteten Contactspitze n versehen, ausserdem trägt sie das um die Axe o leicht bewegliche nach abwärts hängende keilförmige Plättchen p aus Stahl, welches die Palette genannt wird. Endlich sind noch die Verbindungsleitungen ersichtlich. Die eine von dem + Pole der Batterie ausgehende umkreist den Elektromagneten, führt dann zu k' und f' und geht, sobald der Contact bei m geschlossen wird, über diesen nach f, b, k zum negativen Pole zurück. Ausserdem

ist noch die Zweigleitung *d c'* eingefügt, welche mit Ausschaltung der Batterie eine Schliessung der Drahtwindungen des Elektromagneten herstellt, sobald der Contact *s'* geschlossen wird.

Die Wirksamkeit des Apparates ist nun folgende. Das Pendel wird von Anfang an mit freier Hand so weit in Bewegung gesetzt, dass sich das Gleitstück *a* vollständig unter der Schneide der Palette *p* vorbei bewegt. Beim Hin- und Herschwingen schleift dann die Palette bald von links nach rechts, bald in umgekehrter Richtung geneigt über das Gleitstück *a* hinweg, ohne dass dadurch die Axe der Palette *o* gehoben wird. Der Strom bleibt während dieser Zeit ganz unbenutzt, weil der Stromkreis bei *n* unterbrochen ist, in Folge dessen auch die Eisenkerne *m* unmagnetisch bleiben. Hat aber nach einer Anzahl von Schwingungen die Amplitude so weit abgenommen, dass, wie in Fig. 560 angedeutet ist, das Gleitstück *a* nicht mehr vollständig unter *p* hinweg geführt wird, so stemmt sich dann beim Rückgange des Pendels die Palette mit ihrer Schneide in eine der Furchen des Gleitstückes und es wird in Folge dessen die Axe *o* und die Feder *f* gehoben. Hierdurch wird der Contact *n* geschlossen, der Strom magnetisirt den Elektromagneten *m*, welcher nun stark anziehend auf den Anker *e* wirkt, bis dieser die tiefste Lage angenommen hat. In diesem Momente ist die Palette wieder ausser Verbindung mit *a* gekommen und der Strom demnach wieder unterbrochen. Das Pendel hat hierdurch einen so starken Antrieb erhalten, dass es nun wieder längere Zeit mit grösserer Amplitude schwingt. Die Verbindung *d c'* hat nun noch den Zweck, zu verhindern, dass bei *n* ein Unterbrechungsfunke entsteht*). Sobald nämlich die Feder *f* wiederum niedergeht, legt sich einen Moment, bevor der Contact *n* geöffnet wird, die Feder *f'* auf den Stift *s'*, so dass sich der in den Windungen des Elektromagnets entwickelte Inductionsstrom längs der Leitung *d c' s' k' d* entladen kann, wodurch der Contact bei *m* geschont wird.

Wie das Pendel dann zum Betriebe der Uhr benutzt werden kann, haben wir bereits Bd. I, §. 72 gezeigt.

II. Das elektrische Zeigerwerk, welches häufig elektrische Nebenuhr genannt wird.

Bei diesem wird die Bewegung der Zeiger von Secunde zu Secunde oder häufiger von Minute zu Minute durch einen elektrischen Strom vermittelt, welcher durch ein elektrisches Pendel oder eine Centraluhr geschlossen wird. Die letztere kann selbst eine elektromagnetische Uhr oder eine gewöhnliche gut gehende Uhr (Normaluhr) sein. Eine sehr einfache Construction eines elektrischen Zeigerwerks ist jene von Bain, welche durch die schematische Zeichnung Fig. 561 erläutert wird. Es sei *a* ein Zahnrad von 60 Zähnen, welches die Stelle des Secundenrades vertritt. Die Drehung dieses Rades wird aber nun durch den Elektro-

*) Derselbe wird weiter unten erklärt werden.

magneten M in folgender Weise regulirt. So oft der Strom geschlossen wird, in dessen Kreis die Windungen des Elektromagnets M eingeschaltet sind, wird der Kern desselben magnetisch und zieht den Anker r an; dieser Anker trägt aber das Stäbchen h, welches mit einem in die oberste Zahnlücke des Rades a eingreifenden Haken endet. Sobald r angezogen wird, wird h nach rechts bewegt, so dass der Haken über dem Rücken des nächsten Zahnes weggleitet und in die nächste Zahnlücke einfällt.

Wird der Strom unterbrochen, so wird der Haken h durch die Spiralfeder s zurückgezogen und dadurch das Rad a um einen Zahn in der Richtung des kleinen Pfeiles fortgeschoben. — Der Sperrhaken k verhindert eine rückgängige Bewegung des Rades a.

Fig. 560.

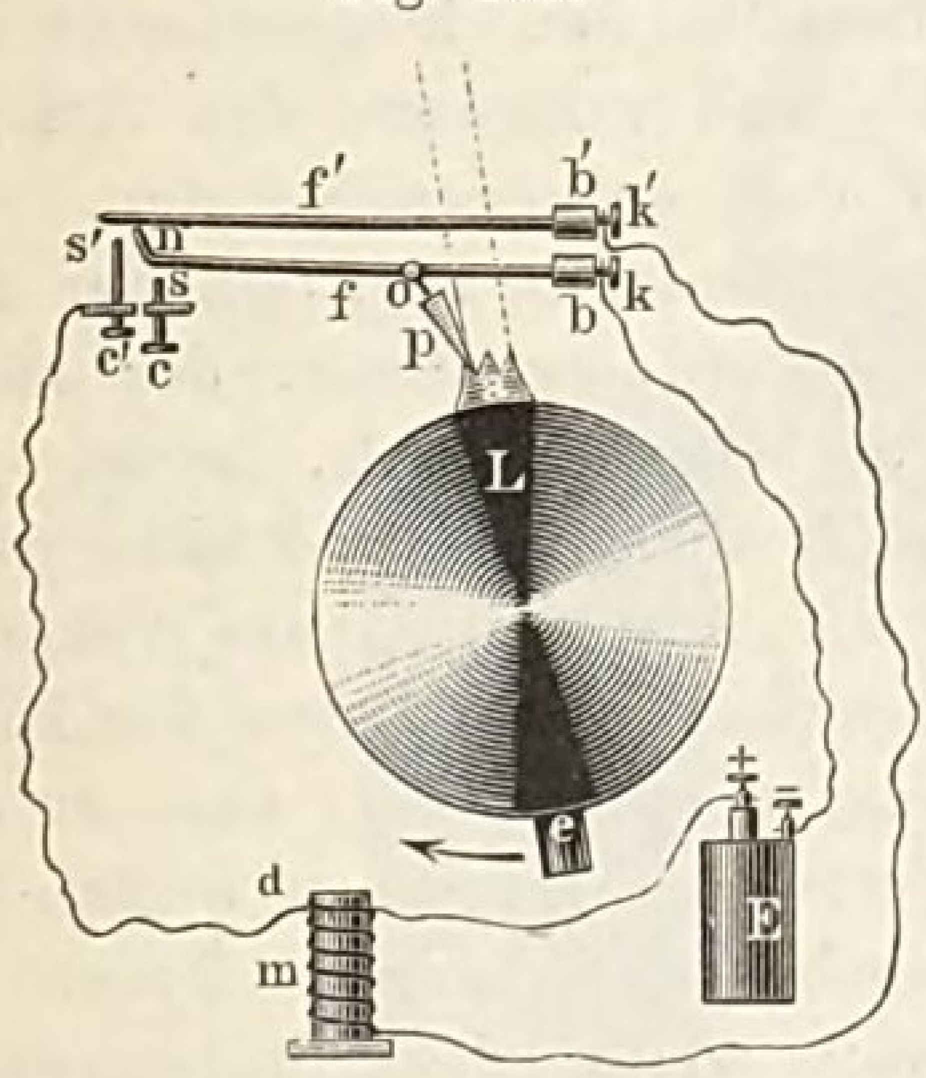
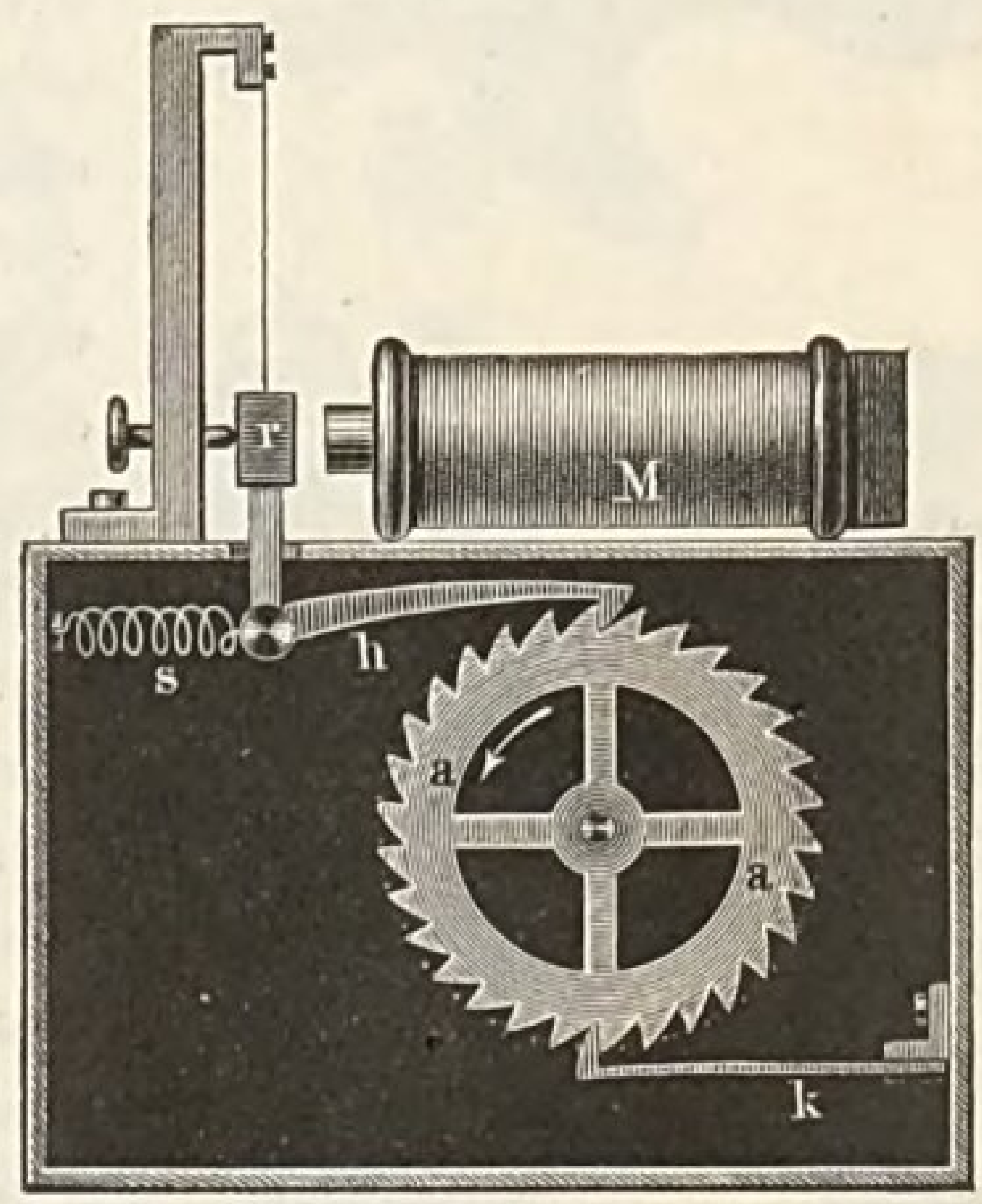


Fig. 561.



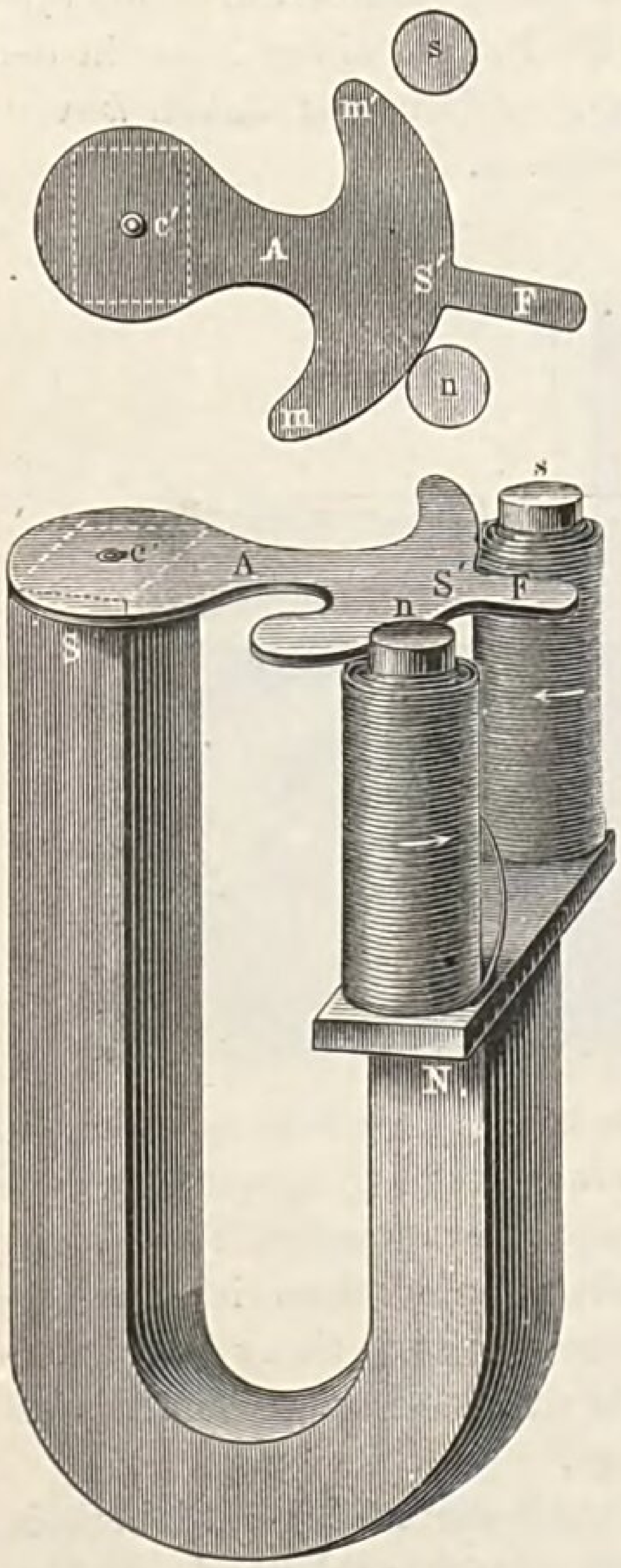
Wird nun der Strom in jeder Secunde auf kurze Zeit geschlossen, so wird das Rad a in jeder Secunde um einen Zahn fortgeschoben; die Bewegung des Secundenrades a wird dann in der gewöhnlichen Weise auf ein Minuten- und ein Stundenrad übertragen, und so ist ein Uhrwerk hergestellt, dessen Gang vollkommen mit dem Gang der Normaluhr harmonirt, welche in jeder Secunde die Schliessung und die sofort erfolgende Oeffnung des Stromes besorgt.

Diese Construction fungirt jedoch nicht mit der nöthigen Sicherheit. Wird nämlich der Contact in der Normaluhr durch schleifende Federn vermittelt, so geben diese leicht durch Vibriren zu wiederholten Contacten Anlass; auch bringt oft die atmosphärische Elektricität Ströme hervor, welche dann das Steigrad öfter vorwärts schieben, als sein sollte. Die Hubhöhe des Ankers r kann nur gering sein, da sonst ein zu starker Strom benöthigt wird; dies hat aber Schwierigkeiten in der Mechanik des Apparates zur Folge. Um diesen Uebelständen abzuhelfen, verwendet Hipp Ströme mit wechselnder Richtung und polarisirte Anker. Durch das Räderwerk der Normaluhr wird nämlich alle Minuten einmal

ein Commutator verstellt, so dass bei dem darauf folgenden Contact, welcher ebenfalls durch das Räderwerk jede Minute einmal vermittelt wird, der Strom der Batterie in entgegengesetzter Richtung dem einzelnen Zeigerwerke, deren eine grössere Zahl in die Leitung eingeschaltet werden kann, entsendet wird.

Jedes Zeigerwerk enthält einen permanenten Stahlmagnet *NS*, Fig. 562, auf dessen einen Pol *N* ein Hufeisenelektromagnet aufgesetzt ist, so dass sich also der Pol des Stahlmagnets in die beiden Schenkel des Hufeisenelektromagnets gabelt. Durch Influenz werden daher die Pole des Elektromagnets, so lange kein Strom geht, gleichnamig magnetisch. Geht ein Strom durch die Windungen, so verstärkt derselbe den Magnetismus des einen Pols und vertauscht den des anderen in den entgegengesetzten. So wird beispielsweise in Fig. 562 der vordere Pol *n* nordmagnetisch, der rückwärtige *s* südmagnetisch, wenn der Strom in der Richtung des Pfeiles geht. Der um die Axe *c'* drehbare Anker *A* wird nun zwischen den Polen des Elektromagnets so angebracht, dass er mit seinem Fortsatz *F* zwischen beiden hin und her schwingen kann. Durch Influenz von Seite des Stahlmagnets wird der Anker derartig magnetisirt (polarisirt), dass er an dem gegen die Pole *n*, *s* gerichteten Theile *S'* einen Südpol erhält, er wird daher von *s* abgestossen, von *n* angezogen. Die Form des Ankers (Patent von Hipp), insbesondere das dessen Aussenfläche begrenzende excentrische Kreissegment *mm'* hat zur Folge, dass derselbe trotz grosser Nähe an den Polen dennoch einen bedeutenden Weg (Drehung um 60⁰) zurücklegen kann, um von einer extremen Stellung zur anderen zu gelangen. Die auf einander folgenden wechselnden Ströme bewegen ihn hin und her. Kommt nun durch irgend einen Zufall, z. B. durch atmosphärische Elektricität, innerhalb der Minute zum wiederholten Male derselbe Strom zu Stande, so findet derselbe entweder seine Arbeit schon gethan, oder falls er den Anker bewegt, so hat dann der nächstfolgende normale Stromschluss Nichts mehr zu thun. Es kann daher hierdurch keine dauernde unrichtige

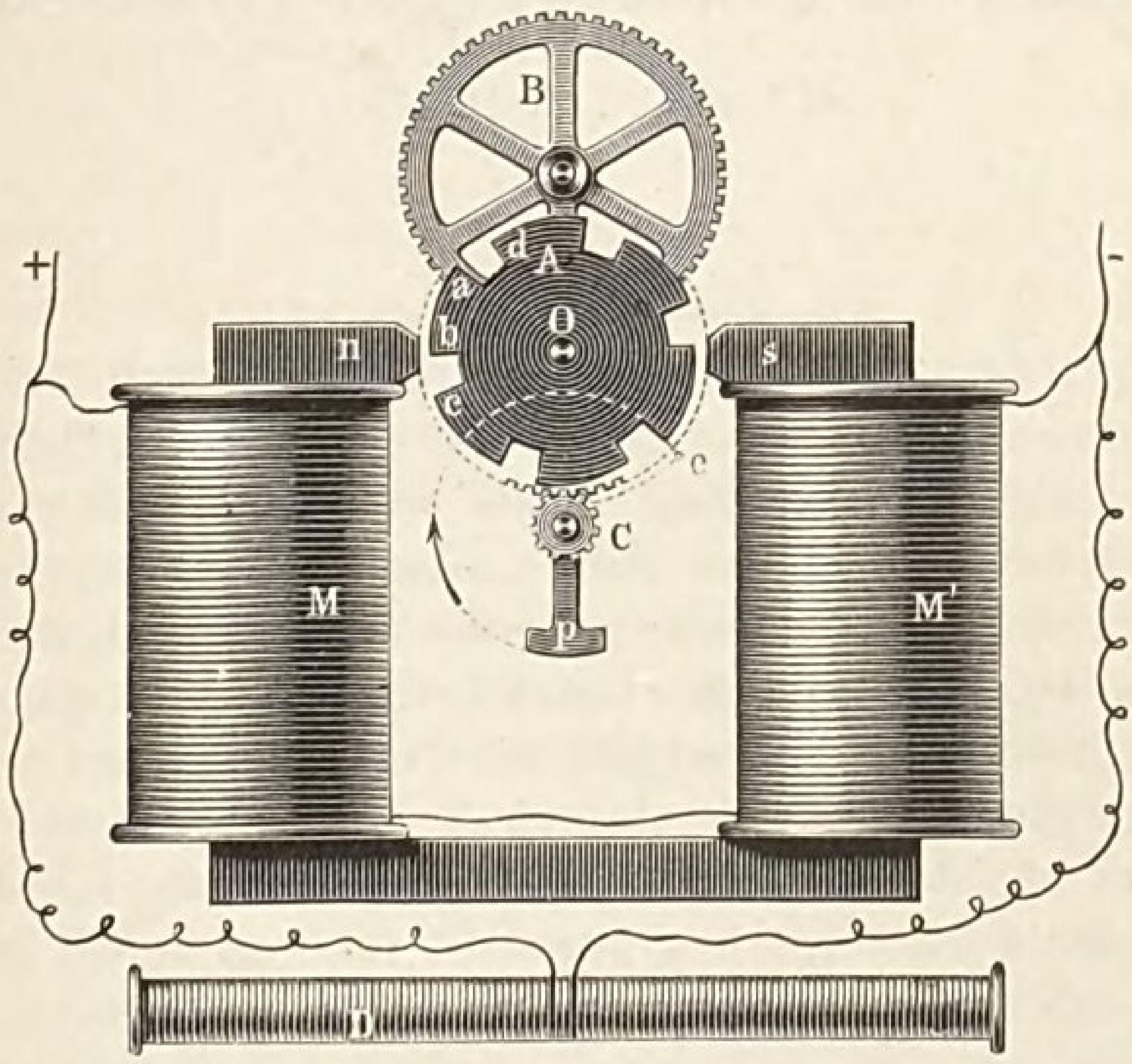
Fig. 562.



Zeigerstellung hervorgebracht werden. Der weitere Mechanismus, den wir hier übergehen, ist nämlich derartig, dass jede Bewegung des Ankers, sowohl hin als her, den Minutenzeiger um eine Minute vorschiebt*).

Eine sehr einfache und sinnreiche Construction besitzt Arzberger's elektrisches Zeigerwerk, wovon in Fig. 563 die wesentlichen Theile schematisch abgebildet sind. Man erkennt sofort den Elektromagnet *MM'* mit den beiden Polen in *n* und *s*, zwischen denen ein radförmiger Anker *A* aus weichem Eisen um die Axe *O* drehbar befestigt ist. Die sechs Zähne des Ankers sind am Aussenrande von excentrischen Kreisbögen begrenzt, derart, dass der Radius *Oa* grösser als der Radius *Ob* ist, u. s. f. bei jedem Zahne. Sobald der Elektromagnet in Thätigkeit versetzt wird, was alle Minuten auf die Dauer einer Secunde geschieht, stellt sich der

Fig. 563.



Anker mit den Ecken wie *a* gegenüber den Polen. Nun ist aber mit derselben Axe *O* auch ein Zahnrad verbunden, dessen Zähne in das Getriebe *C* eingreifen, welches letztere mit dem hammerförmigen Pendel *p* fest verbunden ist. Die Zahnübersetzung ist derart, dass *C* sechsmal umläuft, wenn *A* einmal umgeht. Wenn nun durch den Stromschluss der Anker so bewegt wird, dass die Ecke *a* an die Stelle von *b* tritt, so beschreibt gleichzeitig das Pendel *p* einen Kreisbogen in der Richtung des Pfeiles bis *e*. Hört dann der Stromschluss und damit die Anziehung des Elektromagnets auf, so fällt das Pendel *p* von *e* herab in die unterste Lage und es wird dadurch der Anker so viel gedreht, dass *d* gegenüber von *n* tritt. Dadurch wird also die Ankerstellung für den nächsten Stromschluss vorbereitet. Das Ankerrad *A* greift mittelst eines (nicht

*) Schneebeli, Die elektrischen Uhren, Zürich 1878.

sichtbaren) Getriebes in das Zahnrad B, dessen Axe den Minutenzeiger trägt. Von den mit + und — bezeichneten Drahtenden ist das eine mit dem Pole der Batterie, das andere mit der Contactvorrichtung der Centraluhr in Verbindung. Ausserdem ist noch eine Nebenleitung mit grossem Widerstande auf der Spule D eingeschaltet, welche dazu dient, den Oeffnungsinductionsstrom unschädlich zu machen. Dieses Arzberger'sche elektrische Zeigerwerk hat sich am Polytechnikum in Prag recht gut bewährt.

III. Die elektrischen Uhrcorrectoren dienen dazu, mittelst eines von einer Centraluhr geschlossenen Stromes in grösseren periodischen Zwischenräumen die Zeiger der nicht elektrisch betriebenen Nebenuhren auf richtige Zeit einzustellen. Hierher gehören Steinheil's Stundensteller 1839, Jones' „sympathische“ Uhren und andere, deren Beschreibung wir hier übergehen.

Fünftes Capitel.

Wechselwirkung zwischen Magneten und Stromleitern.

Begriff der Magnetoinduction, Beziehung derselben zum Energieprincip. Wir haben im vorausgegangenen Capitel erfahren, dass der elektrische Strom nicht allein weiches Eisen in einen Magnet zu verwandeln, sondern auch den so entstandenen oder vorher schon vorhandenen Magnet unter gewissen Umständen in Bewegung zu setzen vermag. Da jede Kraftäusserung eine gegenseitige ist, so folgt daraus, dass auch umgekehrt der Magnet auf den Stromleiter bewegend einwirken könne. Wäre z. B. der Magnet einer Tangentenbussole feststehend, hingegen der Ring derselben beweglich, so müsste derselbe durch einen Strom in einer Richtung gedreht werden, welche entgegengesetzt zu jener wäre, nach welcher der Magnet durch den Strom gedreht würde. Es wird unsere Aufgabe sein, genau die Bedingungen und die Gesetze zu ermitteln, unter welchen überhaupt eine Bewegung eines Stromleiters im magnetischen Felde erfolgt. 190

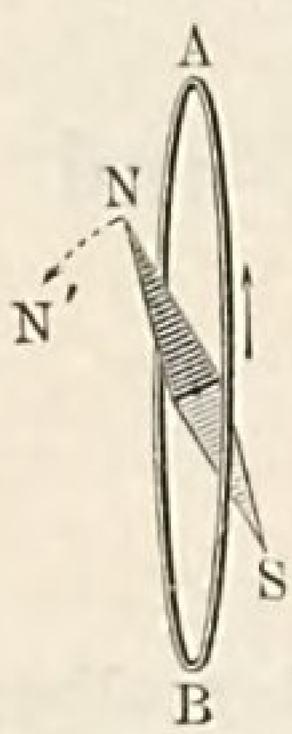
Vorher wollen wir aber noch der Frage nachgehen, woher denn die Energie stammt, welche zu dieser Bewegung erforderlich ist. Falls nämlich die Bewegung im Sinne der Kräfte des Stromleiters und des Magnets stattfindet, so muss von diesen selbst die nöthige Arbeit aufgewendet werden; falls aber der Stromleiter durch eine fremde Kraft entgegen der Wirkung des Magnetfeldes in Bewegung gesetzt wird, muss Arbeit von Aussen zugeführt werden.

Im ersten Falle giebt das System „Magnet und Leiter" Energie ab, im zweiten Falle nimmt es solche auf. Es fragt sich also, woher sie im ersten Falle genommen und wohin sie im zweiten Falle abgegeben wird. Wenn, wie es nahezu wirklich der Fall ist, der Magnet hierbei von seiner potentiellen Energie Nichts verliert oder gewinnt, so kann die

Energie nur dem Stromleiter entnommen beziehungsweise zugeführt werden.

So oft der Stromleiter durch Bewegung Arbeit leistet, nimmt demnach die Stromstärke ab, umgekehrt nimmt sie zu, wenn durch eine äussere Kraft Arbeit zugeführt wird. Indem wir uns die beweisenden Experimente für diese Behauptung vorbehalten, wollen wir zunächst nur den Sachverhalt an einem Beispiele näher auseinandersetzen. Es stelle (Fig. 564) *AB* den Ring einer Tangentenbussole, *NS* ihren Magnet vor. Geht ein (positiver) Strom in der Richtung des Pfeiles durch den Ring, so wird die Magnetnadel unter Ueberwindung des entgegenwirkenden Erdmagnetismus, also unter Arbeitsleistung des Stromes, nach *NN'* abgelenkt. Wenn wir dieselbe Bewegung mit den Fingern herbeiführen, so können wir den Strom nicht hindern, uns dabei zu unterstützen, so dass wir weniger Kraft aufwenden werden, als wenn der Strom nicht da wäre, derselbe leistet also jedenfalls Arbeit, so oft die Nadel in der Richtung *NN'* bewegt wird. In Folge dessen wird der Strom geschwächt, so lange die Nadel bewegt wird*). Wenn wir dagegen die Magnetnadel mit Gewalt in die Ebene des Stromkreises zurückführen, so führen wir dem Systeme von aussen Arbeit zu, welche sich in der vermehrten Stromenergie äussert. Die Wirkungen der Magnetbewegungen können daher auch so aufgefasst werden, dass beide Bewegungen dem Stromleiter einen Strom zuführen, die erstere Bewegung einen negativen, die letztere einen positiven. Diese beiden Ströme haben dabei, wie sofort zu übersehen ist, eine solche Richtung, dass sie selbst der Bewegung des Magnets, durch welche sie entstanden sind, entgegenarbeiten. Jede Bewegung des Magnets schwächt demnach den Strom, der die Bewegung unterstützt, und stärkt denjenigen Strom, welcher der Bewegung entgegenwirkt.

Fig. 564.



Nun denken wir uns den Ring stromlos, oder, was auf dasselbe hinauskommt, von zwei entgegengesetzten gleich starken Strömen durchflossen. Es möge jener in der Richtung des Pfeiles der positive sein. Bewegen wir nun die Magnetnadel nach *NN'*, so muss dies den positiven Strom schwächen, den negativen stärken; bewegen wir die Nadel wieder zurück, so muss dies den positiven Strom stärken, den negativen schwächen. Daraus folgt, dass die resultirende Stromstärke im ersten Falle eine negative, im zweiten Falle eine positive sein wird. Dies ist in der That der Fall und hierauf beruht die sogenannte Magneto-

*) Es verhält sich hier ähnlich, wie bei der Arbeitsleistung eines sich ausdehnenden Gases. Dasselbe arbeitet nicht bloss dann, wenn es den Kolben selbst in Bewegung setzt, sondern auch dann, wenn wir den Kolben mit der Hand herausziehen. Es erfolgt daher auch in beiden Fällen eine Verminderung der Wärme.

induction. Man sagt, der Magnet inducire durch seine Bewegungen einen Strom in dem Leiter. Der Strom heisst ein Inductionsstrom.

Wir haben oben gesagt: Wenn der Magnet hierbei von seiner potentiellen Energie (d. h. von seinem Magnetismus) Nichts verliert oder gewinnt, so kann die Energie (der Magnetbewegung) nur dem Stromleiter entnommen, beziehungsweise zugeführt werden. Diese Bedingung wird nicht ganz erfüllt bleiben können. Derselbe Strom, welcher in Fig. 564 die Nadel ablenkt, stärkt dann auch ihren Magnetismus. Wird demnach durch die Ablenkung der Nadel der positive Strom geschwächt, so muss auch der Magnetismus schwächer werden. Umgekehrt ruft Rückbewegung der Nadel eine Verstärkung des positiven Stromes, also auch Verstärkung des Magnetismus, hervor.

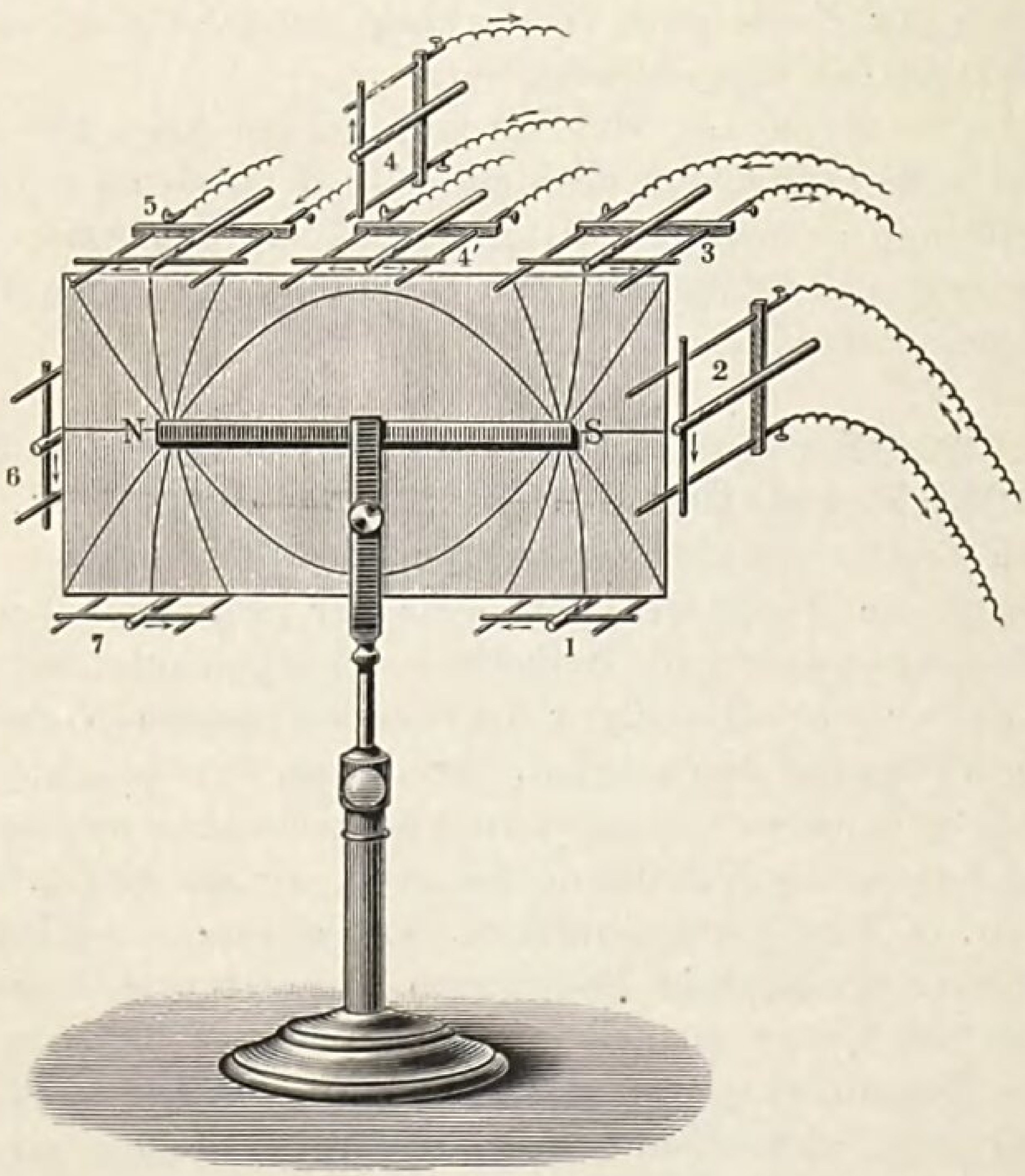
Diese Aenderungen des Magnetismus werden bei einer Nadel aus hartem Stahl wohl verschwindend klein sein; dennoch muss betont werden, dass, strenge genommen, die Abgabe beziehungsweise Aufnahme von Energie sich nicht bloss auf den Strom, sondern zum Theil auch auf den Magnet erstreckt.

Bedingung für die Entstehung des Magnetoinductionsstromes und Regel für die Richtung desselben. 191 Um die theoretischen Ergebnisse des vorangegangenen Paragraphen zu prüfen und überhaupt die Fundamentalversuche der Magnetoinduction anzustellen, wollen wir zunächst die Inductionswirkungen untersuchen, welche ein begrenzter geradliniger Leiter bei seinen Verschiebungen im Felde eines Magnetstabes erleidet. Zu diesem Zwecke können wir uns in Ermangelung eines weiter unten zu beschreibenden, zweckmässigeren Apparates der einfachen Anordnung bedienen, wie sie in Fig. 565 (a. f. S.) dargestellt ist. Ein möglichst kräftiger, etwa aus mehreren Lamellen zusammengesetzter geradliniger Magnetstab ist horizontal in seiner Mitte festgeklemmt und hinter ihm ein steifes Papierblatt befestigt, auf welchem einige Kraftlinien gezogen sind. In möglichster Nähe zu dem Magnet wird dann abwechselnd in verschiedenen Lagen eine Vorrichtung angebracht, welche aus zwei starken blanken Kupferdrähten besteht, die an einem Holzstäbchen in paralleler Lage befestigt und mittelst angesetzter Leitungsdrähte mit den Polen eines recht empfindlichen, abseits aufgestellten Projectionsgalvanometers verbunden sind. Auf diesen Kupferdrähten als Schienen gleitet ein quer aufgesetztes Kupferdrahtstück, welches mit seiner Mitte quer am Ende eines als Handhabe dienenden Stäbchens befestigt ist. Dieses Drahtstück bildet den linearen Leiter, in welchem bei seiner Bewegung die elektromotorische Kraft geweckt wird.

Würden wir den Stromleiter, ohne ihn auf die Kupferschienen aufzulegen, frei durch das magnetische Feld bewegen, so würde die elektromotorische Kraft in ihm keinen geschlossenen Strom wecken können; die entgegengesetzten Elektricitäten würden zwar gegen die Enden des

Leiters getrieben und daselbst während der Bewegung sich stauen und anhäufen, nach Aufhören der Bewegung aber sofort wieder zusammenfliessen und nichts zurücklassen, als ein unmerkliches Quantum Wärme als Aequivalent der von uns aufgewendeten Arbeit. Würden wir den Stromleiter direct mittelst der beweglichen Drahtleitungen mit dem Galvanometer verbinden, so würden wir mit seiner Bewegung auch eine Bewegung der Zuleitungsdrähte ausführen und wären dann nicht im Stande, die Inductionswirkung auf letztere von jener auf das gerade

Fig. 565.



Leiterstück zu trennen. Bei der oben beschriebenen Anordnung des Experiments bleiben die Zuleitungsdrähte unbeweglich, die Inductionswirkung wird auf das zu verschiebende Leiterstück beschränkt und der Strom kann dennoch dem Galvanometer zugeführt werden.

Indem wir nun die Versuche in allen möglichen Lagen des Leiters und allen Bewegungsrichtungen variiren, bemerken wir, dass nicht immer bei der Verschiebung eine Wirkung auf das Galvanometer stattfindet. In Fig. 565 sind zunächst solche Versuche abgebildet, bei welchen der Leiter eine Lage parallel der Zeichnungsebene hat und senkrecht auf dieselbe von rückwärts nach vorn verschoben wird. Wir erhalten Ströme in den Fällen 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, aber nicht in dem Falle, der mit 4′ bezeichnet ist. Wir würden auch keinen Strom erhalten, wenn der Lei-

ter in der Magnetaxe liegend verschoben würde. Das Ergebniss aller dieser Versuche lässt sich in die Regel zusammenfassen:

Im Leiter wird eine elektromotorische Kraft inducirt, sobald und so lange durch seine Bewegung Kraftlinien durchschnitten werden; solche Bewegungen desselben, welche keine Kraftlinien durchschneiden, erregen auch keine elektromotorische Kraft.

Bei dem Versuche 4′ zum Beispiel geht der Leiter nahe parallel zwischen den Kraftlinien durch, dabei erhalten wir auch keinen Strom. Halten wir das Schienengestell parallel einer Kraftlinie, so bekommen wir auch keinen Strom, da dann der Leiter zwar senkrecht auf einer Kraftlinie steht, aber längs einer solchen bewegt wird.

Die Richtung der elektromotorischen Kraft beziehungsweise des Stromes ist bei den in der Figur dargestellten Versuchen durch Pfeile angegeben. Sie lässt sich nach einer Regel vorausbestimmen, welche Faraday, der Entdecker dieser Erscheinungen, folgendermaassen angegeben hat:

Man denke sich selbst schwimmend in der Richtung der Kraftlinien*) mit dem Gesichte schauend nach der Richtung der Bewegung des Leiters, dann ist der Inductionsstrom nach rechts gerichtet.

Eine, wie uns scheint, recht zweckmässige Formulirung dieser Faraday'schen Regel hat J. A. Fleming**) gegeben, sie lautet:

„Man halte den Zeigefinger, Mittelfinger und Daumen der rechten Hand so, dass sie nahezu senkrecht auf einander stehen, wie die Axen eines rechtwinkeligen Coordinatensystems. Hierauf bringe man den Zeigefinger in die Richtung der Kraftlinien, so dass die Fingerspitze dahin zeigt, wo der Nordpol einer Magnetnadel hinzeigen würde, den Daumen in die Richtung der beabsichtigten Bewegung, dann zeigt der Mittelfinger die Richtung des positiven Stromes im Leiter an."

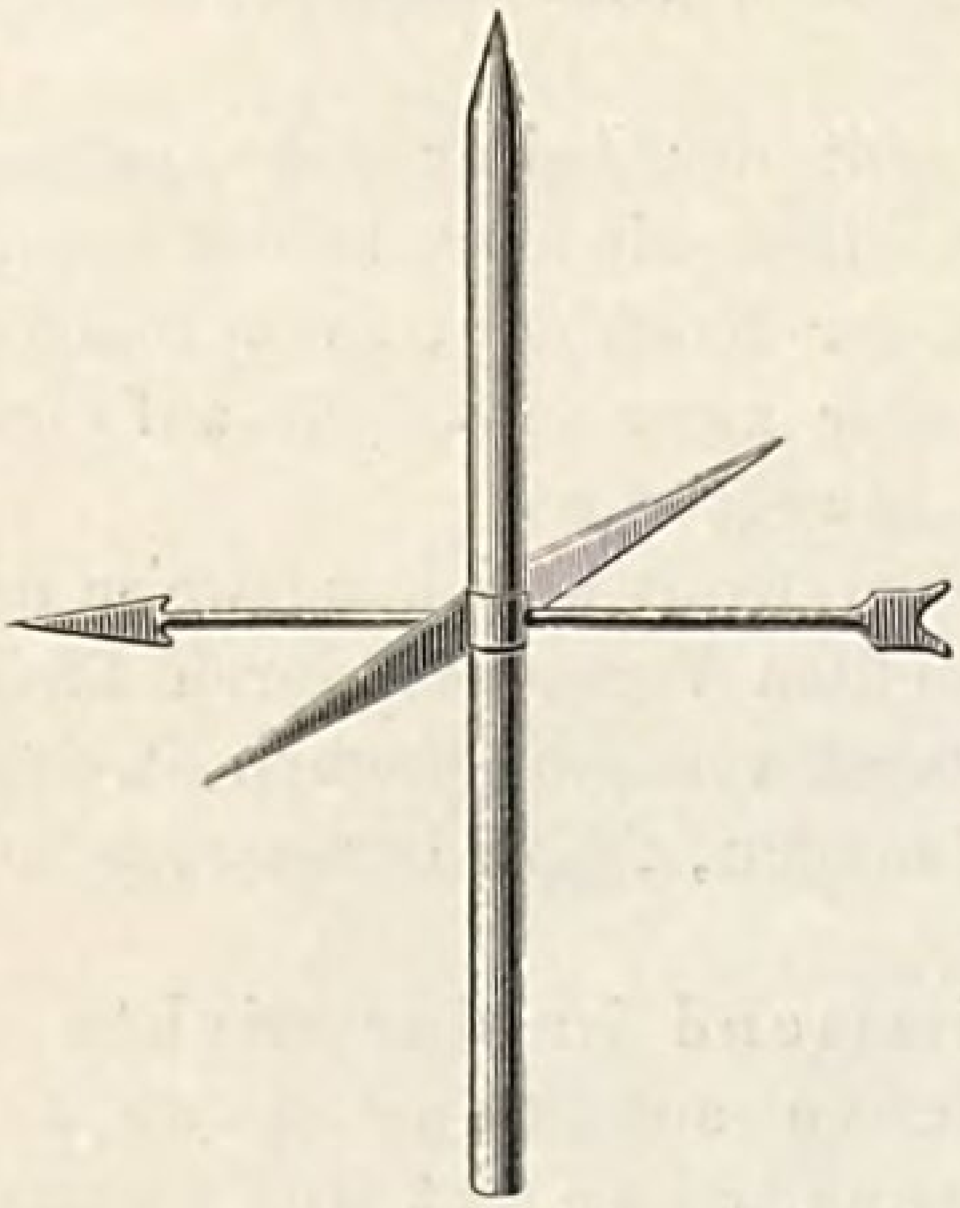
Noch etwas bequemer, aber freilich nicht immer zur Hand, ist die vom Verfasser angegebene, in Fig. 566 (a. f. S.) abgebildete Vorrichtung, welche man „automatischen Inductionszeiger" nennen könnte. Ein an einem Ende zugespitzter Kupferdraht, eine Magnetnadel und ein messingener Pfeil bilden mit einander eine Art rechtwinkeliges Raumcoordinatensystem. Dabei sind Magnetnadel und Pfeil starr mit einander zu einem Kreuz verbunden, welches sich um den Kupferdraht als Axe leicht drehen lässt. Fasst man diese Vorrichtung am stumpfen Ende

*) Darunter ist stets die Richtung verstanden, welche die Kraftlinien ausserhalb des Magnets vom Nordpol ausgehend gegen den Südpol führt; es ist dieselbe Richtung, nach welcher eine frei bewegliche Magnetnadel mit ihrem Nordpole zeigen würde.

**) The Electrician XIV, p. 396.

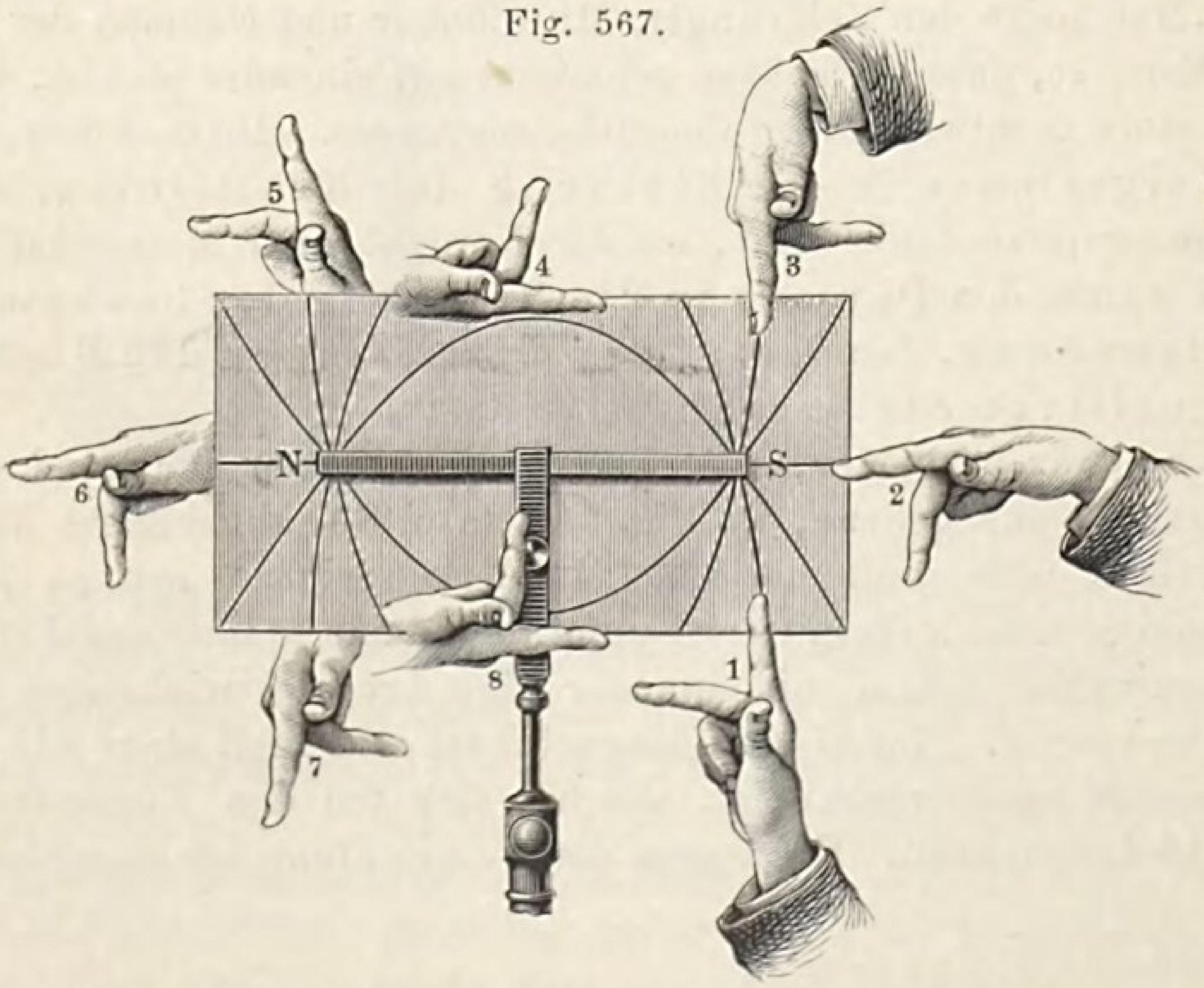
des Kupferdrahtes, welcher den Stromleiter vorstellt, und hält sie in ein magnetisches Feld, so stellt sich die Magnetnadel von selbst so nahe als möglich in die Richtung der Kraftlinien, und der Pfeil deutet die auf den Leiter senkrechte Bewegungsrichtung an, welche einen Strom in der Richtung der Kupferspitze hervorrufen würde. Sollte die Richtung der Kupferspitze mit der Richtung der Kraftlinien ganz zusammenfallen, so würde die Magnetnadel indifferent in jeder Lage stehen bleiben, der Pfeil also ebenfalls keine bestimmte Direction anzeigen. In diesem Falle bringt auch eine Bewegung des Leiters nach den Pfeilrichtungen keine elektromotorische Kraft hervor, da hierbei keine Kraftlinien geschnitten würden.

Fig. 566.



Die Fig. 567 zeigt die Anwendung der oben mitgetheilten Regel auf die in Fig. 565 unter 1 bis 7 angedeuteten Fälle, wozu noch ein achter hinzugekommen ist. Ueberall ist der Zeigefinger in die Richtung einer Kraftlinie vom Nordpol fort oder gegen den Südpol hinzeigend gehalten, der Daumen ist in allen acht Fällen nach

Fig. 567.



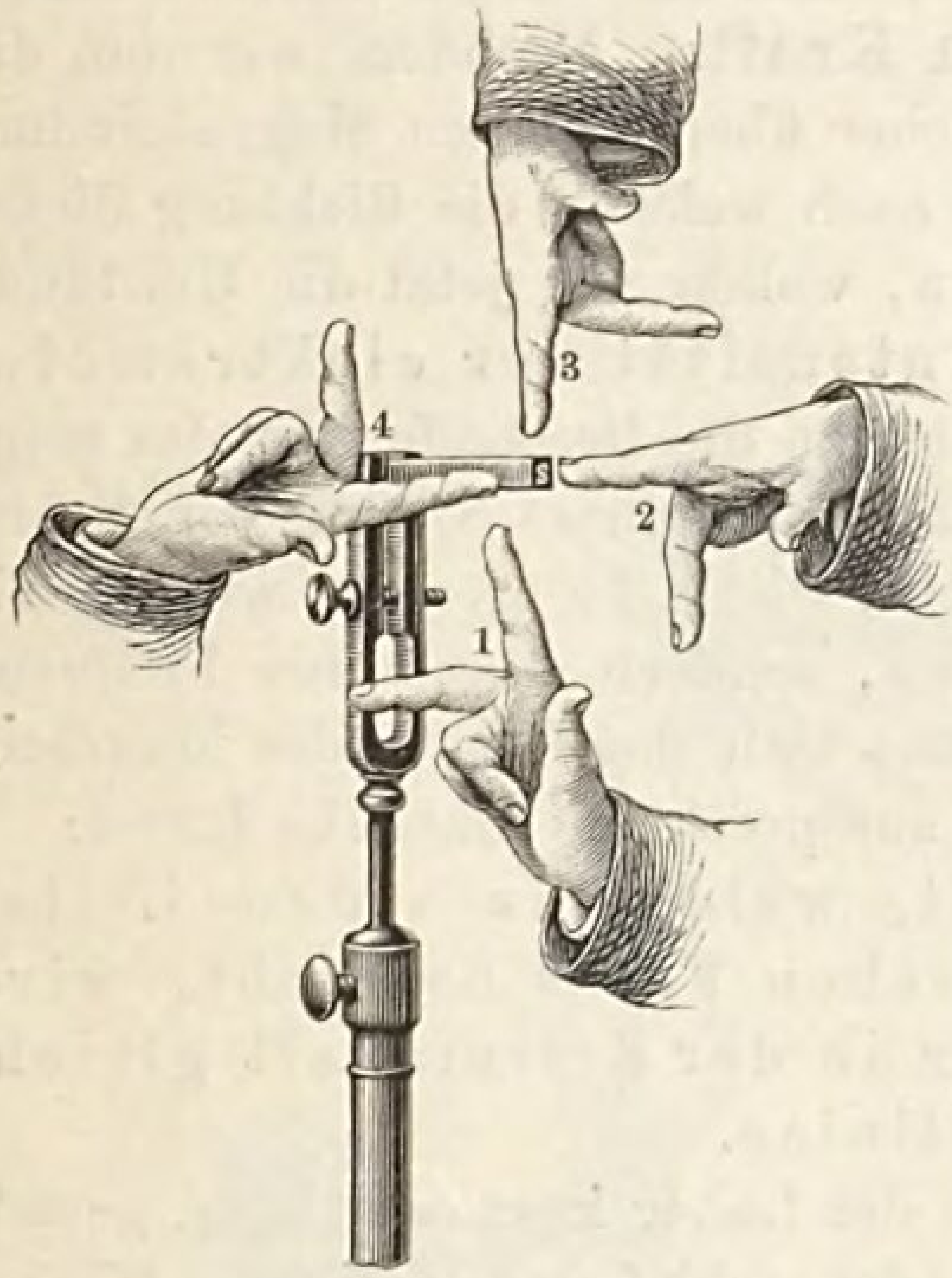
vorn gerichtet, der Mittelfinger giebt die Stromrichtung an. Fig. 568 zeigt die Anwendung derselben Regel für Fälle, in welchen der Stromleiter in einer auf der Magnetaxe senkrechten Ebene liegt und parallel

zur Magnetaxe von der Mitte gegen den Südpol und darüber hinaus bewegt wird.

In allen diesen Fällen kehrt sich die Stromrichtung um, wenn entweder die Bewegungsrichtung umgekehrt, oder die Pole vertauscht werden.

Der Strom kann jedoch auch dann seine ursprüngliche Richtung umkehren, wenn der Leiter seine geradlinige Bewegung fortsetzt, nämlich dann, wenn er dabei Kraftlinien begegnet, deren Richtung in Bezug auf die bis dahin durchschnittenen umgekehrt ist. Wenn man z. B. den Leiter in einer zur Magnetaxe parallelen Ebene, jedoch in einer zu jener senkrechten Lage längs des Magnets von einem Pole zum andern verschiebt, so schneidet der Leiter zunächst die Kraftlinien alle im gleichen Sinne, behält also auch seine Stromrichtung bei, bis er der Mitte des Magnets gegenüber zu liegen kommt. Dort hört die elektromotorische Wirkung auf, da die Bewegung parallel zu den Kraftlinien geschieht. Nach Ueberschreitung der Mittelebene werden dieselben Kraftlinien noch einmal von innen nach aussen durchschnitten und unsere Regel ergiebt eine zur früheren entgegengesetzte Stromrichtung. Wir sagen, ein Leiter durchschneide die Kraftlinien gleichsinnig, wenn er sie alle so durchschneidet, dass der Strom immer dieselbe Richtung im Leiter behält.

Fig. 568.



Sehr häufig kommt es aber auch vor, dass der Leiter mit einem Theile in dem einen Sinne, mit einem anderen Theile in dem anderen Sinne die Kraftlinien schneidet, so dass die elektromotorischen Kräfte entgegengesetzte Ströme in ihm induciren, die sich dann in Bezug auf den ganzen Schliessungskreis entweder theilweise oder ganz compensiren. Aus Fig. 565 ersieht man z. B., dass der Leiter in den Lagen 3 und 5 entgegengesetzte elektromotorische Kräfte erhält. Würden demnach die Leiter 3 und 5 einen zusammenhängenden Leiter bilden, welcher parallel zum Magnet um dessen Axe rotirt, so würden in diesem Leiter zwei gleiche Ströme von der Mitte gegen die Enden inducirt werden, die sich im Schliessungskreise compensiren. Ein Strom könnte nur dann resultiren, wenn sich der Leiter von der Mittelebene des Magnets aus ungleich weit nach beiden Seiten erstreckt, so dass die Ströme sich nur theilweise compensiren. Damit man von einem Leiter sagen könne, er schneide die Kraftlinien gleichsinnig, müssen also alle Theile desselben die letzteren gleichsinnig schneiden.

Ein anderes Beispiel für einen solchen Leiter, der in seinen Hälften entgegengesetzte Inductionswirkung erfährt, wäre folgendes: Der Leiter hat die Lage eines Durchmessers in einem senkrecht auf die Magnetaxe gestellten Kreise und rotirt um diese Axe. Dabei kann sich der Leiter zwischen den Polen oder ausserhalb derselben befinden. Stets gehen dann die Ströme entgegengesetzt von der Axe nach beiden Seiten nach aussen oder von aussen zur Axe. Wir werden weiter unten Apparate beschreiben, mittelst welcher alle diese Fälle verwirklicht werden können.

192 **Gesetz über die Grösse der durch Magnetoinduction geweckten elektromotorischen Kraft.** Nachdem wir nun die Bedingung kennen gelernt, unter welcher überhaupt ein Magnetoinductionsstrom entsteht, sowie die Regel, nach welcher die Richtung dieses Stromes vorher bestimmt werden kann, wollen wir jetzt die Umstände näher untersuchen, von welchen die Intensität der elektromotorischen Wirkung abhängt. Kennt man die Beschaffenheit des magnetischen Feldes, indem man ein richtig construirtes System von Kraftlinien für dasselbe besitzt, bei welchem, wie §. 29 erörtert wurde, die Kraftlinien nicht nur die Kraftrichtung, sondern durch ihre Frequenz auch die Kraftgrösse darstellen, so lässt sich das Gesetz der Magnetoinduction in classisch einfacher Form aussprechen. Dasselbe lautet:

Die elektromorische Kraft, welche in einem Leiter durch Bewegung im magnetischen Felde entsteht, wird gemessen durch die Anzahl der in der Zeiteinheit gleichsinnig durchschnittenen Kraftlinien.

Dieses Gesetz gilt allgemein, mag der Leiter kurz oder lang, gerade oder krumm sein, mag er senkrecht oder schief gegen die Kraftlinien gerichtet sein, gerade oder schief, schneller oder langsamer durch dieselben bewegt werden, grösseren oder geringeren Widerstand haben.

Die Stromstärke hängt dann begreiflicher Weise auch vom Widerstande ab; bei gleichem Widerstande ist auch sie der Anzahl der per Zeiteinheit geschnittenen Kraftlinien proportional.

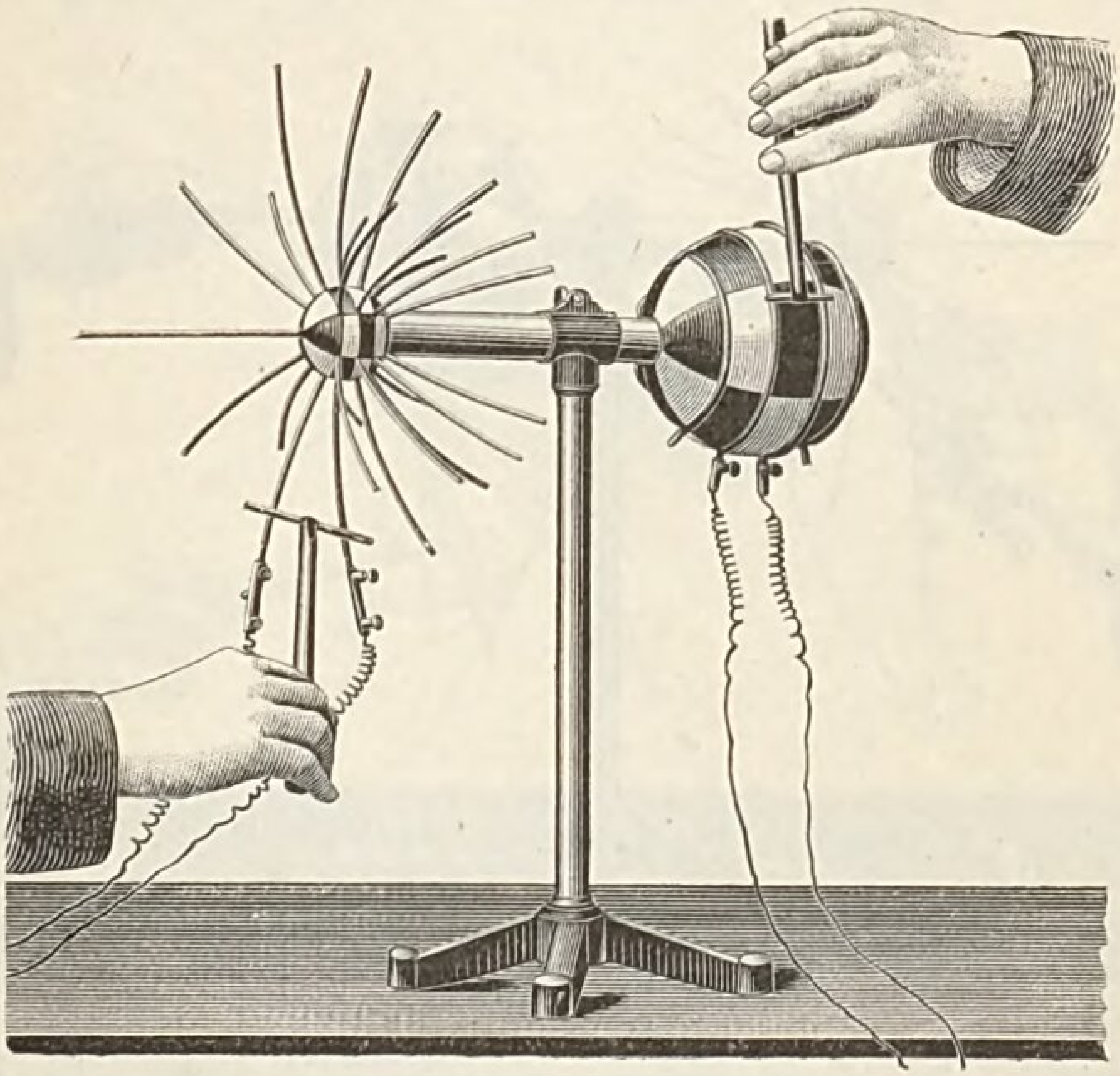
Da die Stromstärke gleich der in der Zeiteinheit durchfliessenden Elektricitätsmenge ist, so folgt, dass unabhängig von der Zeitdauer in Leitern gleichen Widerstandes jede gleiche Anzahl durchschnittener Kraftlinien eine gleiche Menge von Elektricität in Bewegung setzt.

Die Einfachheit dieser Beziehungen lässt den Werth der Darstellung des Magnetfeldes durch seine Kraftlinien erst recht hervortreten und rechtfertigt auf diese Weise die ausführliche Behandlung dieses Gegenstandes in den §§. 29 bis 33.

Um das angeführte Inductionsgesetz zunächst mit der Beschränkung auf senkrechte Lage und Bewegungsrichtung des Leiters gegenüber den Kraftlinien durch Vorleseversuche zu bestätigen, können wir uns des in

Fig. 569 bis 571 abgebildeten, sofort zu beschreibenden Apparates bedienen*). Derselbe ist auch geeignet, die oben im §. 191 beschriebenen Versuche mit grösserer Exactheit und Bequemlichkeit auszuführen. Auf einer verticalen Säule mit Fussgestell ist mit Scharnierband und Schraube in horizontaler Lage ein starker gerader Magnet mit cylindrischem Querschnitt (ein aus fünf Stäben zusammengesetztes Magazin oder auch ein Elektromagnet) drehbar und längs der Axe verschiebbar befestigt. Ueber beide Pole sind hölzerne Fassungen geschoben, welche nahezu die Form von Kugeln haben, in Wirklichkeit aber **Niveauflächen** darstellen (siehe §. 31).

Fig. 569.

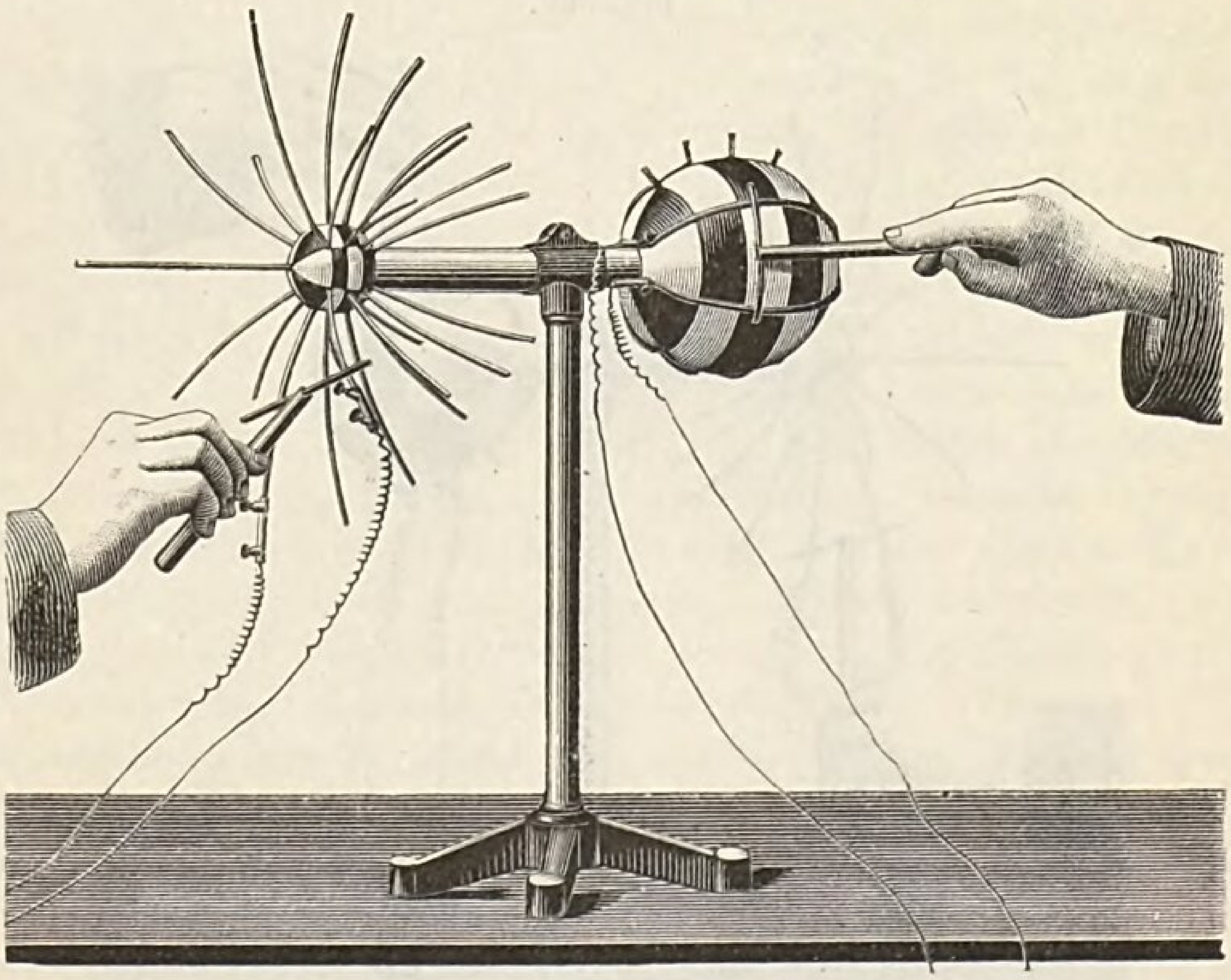


Die eine, kleinere Niveaufläche linker Hand trägt eine Anzahl (25) von ihr ausgehender starker Metalldrähte mit versilberter, nicht gefirnisster Oberfläche, welche Kraftlinien vorstellen, und deren Form genau der Fig. 72 (S. 81) entspricht, nur dass von den dort gezeichneten Linien jede zweite fortgelassen wurde. Die Längen dieser Drahtstücke sind so bemessen, dass ihre äusseren Enden ebenfalls in einer Niveaufläche liegen. Die Niveaufläche des anderen Pols zur rechten Hand ist, wie die zur linken, durch sechs Meridiane und vier Parallelkreise in 30 abwechselnd weiss und schwarz gefärbte Felder abgetheilt, so dass die

*) Pfaundler, Ein neuer Apparat zur Demonstration der Fundamentalversuche der Magnetinduction (Zeitschr. f. d. physik. u. chem. Unterricht, I, S. 53, 1887).

Ecken dieser Felder den 25 Kraftlinien entsprechen. Denkt man sich die Anzahl dieser Kraftlinien sehr vermehrt, so würde jedes dieser Felder eine gleiche Anzahl, nämlich genau den 30. Theil sämmtlicher Kraftlinien hindurchtreten lassen. Einige der diese Felder begrenzenden Parallelkreise (in Fig. 569 auf der Vorderseite), sowie einige der Meridiane (in Fig. 570 nach Umdrehung der Kugel sichtbar) sind mit unter sich isolirten versilberten Kupferdrähten belegt und es können je zwei benachbarte dieser Drähte mit Drahtleitungen verbunden werden, welche zu einem empfindlichen (in der Figur nicht sichtbaren) Projectionsgalvano-

Fig. 570.



meter führen. Ebenso können je zwei benachbarte Kraftliniendrähte in dieser Weise mit dem Galvanometer verbunden werden, wie aus den Figuren zu ersehen ist. Die Kraftliniendrähte, sowie die auf der Niveaufläche befestigten, haben nämlich hier dieselbe Rolle als Schienen zu spielen, wie bei den Experimenten in §. 191.

Der Leiter, dessen Bewegung die elektromotorische Kraft hervorrufen soll, besteht wie dort aus einem geraden, beziehungsweise schwach gekrümmten, kürzeren oder längeren versilberten Kupferdrahtstücke, welches am Ende eines Holzstäbchens quer befestigt ist.

Die anzustellenden Versuche zerfallen nun in zwei Reihen.

In der ersten Versuchsreihe wird gezeigt, dass kein Strom entsteht, wenn keine Kraftlinien geschnitten werden. Die Hauptfälle, welche hierbei vorkommen, und auf welche später alle anderen zurückgeführt werden können, sind folgende:

I. Der Leiter bewegt sich auf einer Schnittebene durch die Magnetaxe.

a. Die Lage des Leiters ist senkrecht auf die Kraftlinien, seine Bewegungsrichtung parallel denselben (Fig. 569 linke Seite).

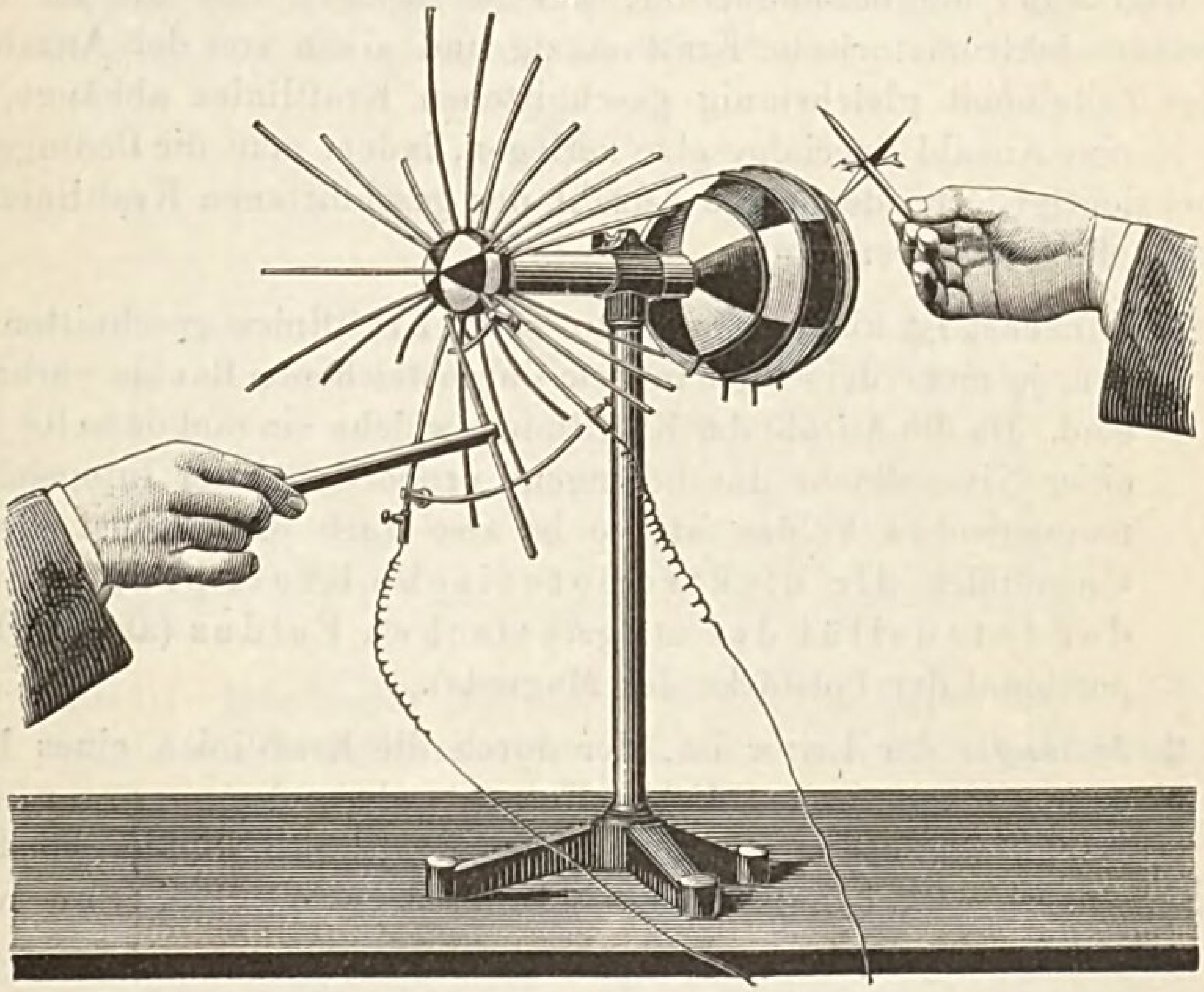
b. Die Lage des Leiters ist parallel zu den Kraftlinien, seine Bewegungsrichtung senkrecht zu denselben.

II. Der Leiter bewegt sich auf der Rotationsfläche einer Kraftlinie.

a. Die Lage des Leiters ist senkrecht auf die Kraftlinien, seine Bewegungsrichtung parallel denselben (Fig. 570 linke Seite).

b. Die Lage des Leiters ist parallel zu den Kraftlinien, seine Bewegungsrichtung senkrecht zu denselben (Fig. 571 linke Seite).

Fig. 571.



Zur Herstellung des letzteren Falles ist die aus der Fig. 571 ersichtliche Ergänzung anzubringen, eine ähnliche, hier nicht abgebildete, ist im Falle I. b. anzubringen.

In der zweiten Versuchsreihe werden auf der rechten Seite des Apparates solche Bewegungen ausgeführt, durch welche Kraftlinien geschnitten, also Ströme geweckt werden. Man hat hier nur die beiden Hauptfälle.

III. Der Leiter bewegt sich auf einer Niveaufläche.

a. Die Lage des Leiters ist senkrecht zu den Parallelkreisen, seine Bewegungsrichtung parallel denselben (Fig. 569 rechte Seite).

b. Die Lage des Leiters ist senkrecht zu den Meridianen, seine Bewegungsrichtung parallel denselben (Fig. 570 rechte Seite).

Ueberfährt man dabei immer je eines der bemalten Felder, so erhält man auch immer gleiche Ausschläge, überfährt man zwei, drei etc. Felder, so wird auch der Ausschlag doppelt, dreifach etc. so gross. Da der Ausschlag der Galvanometernadel, wenn die Bewegung nicht zu langsam erfolgt, der durch das Galvanometer fliessenden Elektricitätsmenge proportional ist, so folgt daraus, dass letztere auch der Anzahl der durchschnittenen Kraftlinien proportional ist*). Zur Ausmittelung der Stromrichtung kann der eben beschriebene Inductionszeiger, wie in Fig. 571 angedeutet, Dienste thun.

193 **Specialisirung des Magnetoinductionsgesetzes, Ableitung der absoluten Einheit der elektromotorischen Kraft.** Das Gesetz der Magnetoinduction, welches besagt, dass die im Leiter geweckte elektromotorische Kraft einzig und allein von der Anzahl der in der Zeiteinheit gleichsinnig geschnittenen Kraftlinien abhängt, lässt sich in eine Anzahl Specialgesetze zerlegen, indem man die Bedingungen berücksichtigt, von denen die Anzahl der geschnittenen Kraftlinien abhängt. Es sind deren fünf.

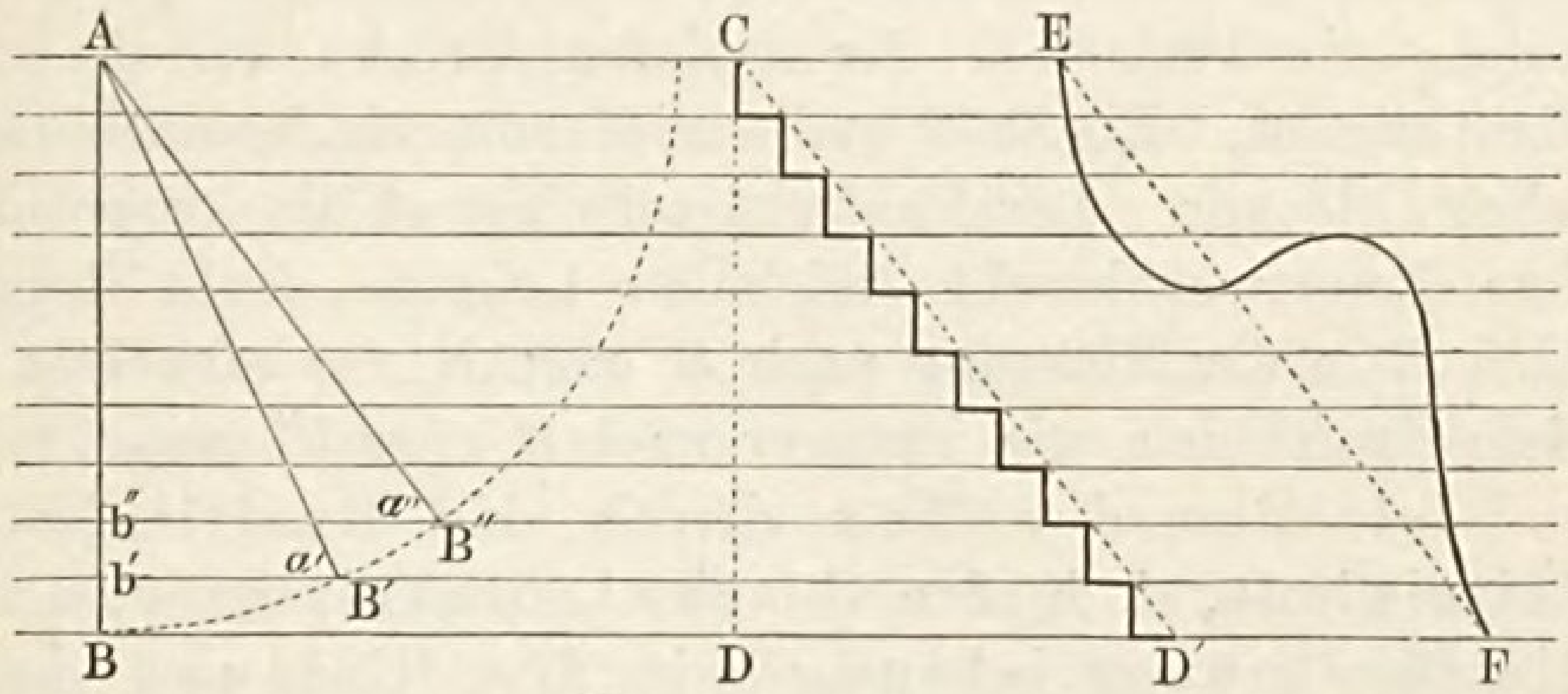
1. Zunächst ist klar, dass desto mehr Kraftlinien geschnitten werden, je mehr derselben in dem durchstrichenen Raume vorhanden sind. Da die Anzahl der Kraftlinien, welche ein und dasselbe Stück einer Niveaufläche durchdringen, proportional der Intensität des magnetischen Feldes ist, so ist also auch unter sonst gleichen Umständen die elektromotorische Kraft proportional der Intensität des magnetischen Feldes (also auch proportional der Polstärke des Magnets).
2. Je länger der Leiter ist, der durch die Kraftlinien eines homogenen magnetischen Feldes bewegt wird, desto grösser ist die Anzahl der von ihm geschnittenen Kraftlinien. Unter sonst gleichen Umständen ist daher die elektromotorische Kraft proportional der Länge des Leiters.
3. Je grösser die Geschwindigkeit des Leiters, desto mehr Kraftlinien werden in der Zeiteinheit durchschnitten; mithin ist die elektromotorische Kraft proportional der Geschwindigkeit des Leiters.

*) Sollen diese Versuche gut gelingen, so müssen vor Allem der Widerstand klein, das Galvanometer genügend empfindlich und der Magnet genügend stark sein, die Leiter und Schienen müssen blank sein. Die Bewegung muss unter gutem Contact, daher nicht allzu rasch (etwa $1/2$ Secunde per Feld) vor sich gehen; Störungen durch Thermoströme sind zu vermeiden. Ich erhalte an meinem Apparate ungefähr 10 mm Scalenausschlag per Feld. Ist die Wirkung zu schwach, so kann sie durch eine Multiplicationsmethode sichtbar und messbar gemacht werden.

Dies darf nicht dahin missverstanden werden, als ob bei den im §. 192 beschriebenen Versuchen das Galvanometer den doppelten Ausschlag geben würde, wenn man ein Feld der Niveaufläche mit doppelter Schnelligkeit überfahren würde; denn in diesem Falle dauert der doppelt so starke Strom nur halb so lange und hat daher auf die Galvanometernadel dieselbe Wirkung. Würde die doppelt so schnelle Bewegung gleich lange Zeit andauern, so würde man die doppelte Anzahl Kraftlinien schneiden und dann würde auch der Galvanometerausschlag doppelt so gross ausfallen.

4. Steht der Leiter nicht senkrecht, sondern schief auf den Kraftlinien eines homogenen magnetischen Feldes, wird er aber in einer auf die Kraftlinien senkrechten Richtung bewegt, so ist leicht zu zeigen, dass er ebenso wirkt, wie ein Leiter von der Länge der Projection der schiefen Länge auf die senkrechte Lage. Es stelle in Fig. 572 das parallele Liniensystem äquidistante Kraftlinien

Fig. 572.



vor*). Der Leiter AB werde einmal in dieser Lage senkrecht gegen die Kraftlinien (also senkrecht auf die Papierebene) bewegt, dann ein zweites Mal in der Lage AB', endlich in der Lage AB''.

In den letzten beiden Fällen schneidet der Leiter offenbar ebenso viele Kraftlinien, wie ein senkrecht gestellter Leiter von der Länge Ab' beziehungsweise Ab''. Ist also die Länge des Leiters l, so ist seine Wirkung stets dem Producte $l . \sin \alpha$ proportional, wobei α der Winkel ist, den Leiter und Kraftlinien einschliessen.

Wir können auch auf folgende Weise überlegen: Ein Leiter von der gazackten Form und Lage CD', welcher senkrecht durch die Kraftlinien bewegt wird, wirkt offenbar mit denjenigen Strecken nicht, welche parallel zu den Kraftlinien liegen. Die wirksamen, senkrecht gelegenen Strecken

*) Dass hier das homogene magnetische Feld durch äquidistante Parallelen dargestellt wird, während es im §. 33 durch Parallelen mit veränderlicher Distanz dargestellt wurde, erklärt sich dadurch, dass wir hier die Zeichnungsebene parallel zu sich selbst verschoben denken, während wir uns im §. 33 vorstellten, dass die Zeichnungsebene um eine der Kraftlinien rotire.

dagegen machen mit einander eine Länge gleich $CD = CD' \sin\alpha$. Je kleiner wir die Zickzackstücke werden lassen, um so mehr nähern wir uns der schiefen Geraden CD', welche demnach auch nicht anders wirken kann, als die senkrechte Gerade CD. Durch eine ähnliche Ueberlegung sehen wir auch ein, dass ein zwischen C und D' irgendwie geformter Leiter, z. B. EF, bei seiner Bewegung durch das homogene Feld dieselbe Gesammtwirkung an elektromotorischer Kraft erhalten wird, wie ein gerader Leiter CD. Dies gilt selbst dann, wenn einzelne Theile des Leiters zwischen C und D' die Kraftlinien entgegengesetzt liegend durchschneiden, so dass in ihnen theilweise entgegenwirkende elektromotorische Kräfte auftreten. Es verhält sich hier ähnlich, wie mit der Gesammtarbeit bei Annäherung zweier Magnetpole §. 28.

5. Ist endlich zwar der Leiter senkrecht auf die Kraftlinien gelegen, aber die Richtung der Bewegung durch die Kraftlinie eine schiefe, so dass sie mit den letzteren einen Winkel β einschliesst, so lässt sich für die Wirkung ganz analog mit Obigem zeigen, dass sie ebenso gross ist, wie bei senkrechter Bewegung längs einer Strecke, welche die Projection der schiefen Strecke auf die senkrechte Richtung ist. Fig. 572 stelle wiederum ein homogenes magnetisches Feld vor. Der Punkt A sei diesmal die Projection des auf dem Papier senkrecht stehenden Leiters. Geht derselbe statt nach B in der Richtung nach B' oder B'', so schneidet er ebenso viele Kraftlinien, wie wenn er nach b' oder b'' ginge.

 Ist also der Weg durch die Kraftlinien in der Zeiteinheit, d. h. die Geschwindigkeit $= v$, und bildet die Bewegungsrichtung mit der Richtung der Kraftlinien einen Winkel $= \beta$, so ist die Inductionswirkung proportional mit $v \sin\beta$.

Auch hier wäre die mittlere elektromotorische Kraft, also (bei gleichem Widerstande) auch die mittlere Stromstärke dieselbe, wenn der Leiter in derselben Zeit von C direct nach D, oder im Zickzack nach D' oder längs der krummen Linie von E und F ginge.

Fassen wir die aufgeführten fünf Einzelbedingungen zusammen und bezeichnen:

mit T die Intensität des magnetischen Feldes,
„ l die Länge des Leiters,
„ v die Geschwindigkeit des Leiters,
„ α den Winkel zwischen Leiter und Kraftlinien,
„ β den Winkel zwischen Bewegungsrichtung und der durch Leiter und Kraftlinien gelegten Ebene, so ist die elektromotorische Kraft:

$$E = Tlv \sin\alpha \sin\beta.$$

Sind Lage und Bewegung senkrecht auf die Kraftlinien gerichtet, so werden die Sinus = 1 und

$$E = Tlv \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

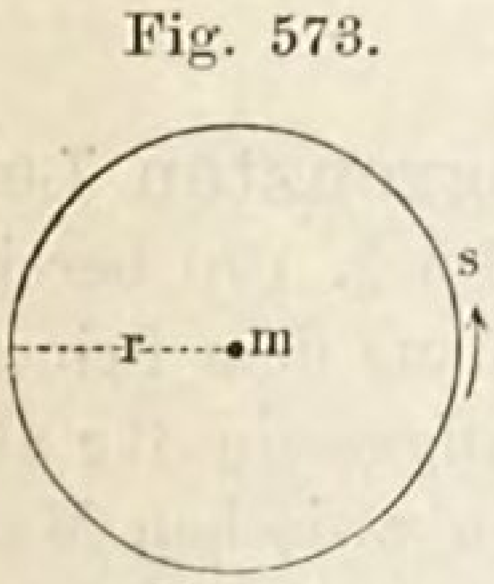
Misst man T, l und v nach Centimeter, Gramm und Secunde, so erhält man auch E gemessen nach dem (C. Gr. S.)-System.

Demnach gilt als Einheit der elektromotorischen Kraft jene, welche in einem Leiter von 1 Centimeter Länge hervorgerufen wird, der mit der Geschwindigkeit von 1 Centimeter per Secunde senkrecht durch die Kraftlinien eines magnetischen Feldes von der Intensität 1 (C. Gr. S.) getrieben wird.

Auf diesem Wege hat ursprünglich W. Weber, allerdings mit Zugrundelegung des Millimeters und Milligramms statt des Centimeters und Gramms, die absolute Einheit der elektromotorischen Kraft abgeleitet. Mit Hülfe des Ohm'schen Gesetzes und der früher definirten absoluten Stromeinheit erhielt er dann die Einheit des Widerstandes als jenen Widerstand, in welchem die Einheit der elektromotorischen Kraft die Stromeinheit entwickelt.

Wir haben in den §§. 126 und 131, da uns die Inductionsgesetze noch nicht zur Verfügung standen, einen anderen Weg eingeschlagen, der aber zu demselben Ergebnisse führt. Wir definirten zuerst §. 126 die absolute Widerstandseinheit als den Widerstand jenes Leiters, in welchem der Strom Eins per Secunde die Arbeit Eins (1 Erg in Form äquivalenter Wärme) erzeugt, wobei wir uns auf das Gesetz von Joule stützten. Aus dem Ohm'schen Gesetze folgte dann §. 131 die Definition der elektromotorischen Krafteinheit als jene elektromotorische Kraft, welche im Widerstande Eins die Stromeinheit entwickelt. Dass beide Wege zu denselben Maassen für Widerstand und elektromotorische Kraft führen, lässt sich, gestützt auf das Gesetz von der Erhaltung der Energie und auf die Betrachtungen des §. 190, auf folgende Weise zeigen.

Fig. 573.



Wir denken uns einen ringförmigen Stromleiter, Fig. 573, vom Radius r, in dessen Mitte ein Magnetpol von der Stärke $+m$ vorhanden ist. Die Intensität des von diesem erzeugten magnetischen Feldes im Abstande r ist $\frac{m}{r^2} = T$. Die Länge des Leiters ist $2r\pi = l$. Wird dieser Leiter in der Richtung der Ringaxe mit der Geschwindigkeit v bewegt, so schneidet er die Kraftlinien senkrecht, es entsteht in ihm nach dem Inductionsgesetz (S. 696) 1) die elektromotorische Kraft $E = Tlv$. Ist der dadurch hervorgerufene Strom J und dauert die Bewegung eine Zeit t, so ist dazu nothwendig eine Kraft $= TJl$ *), welche längs eines Weges vt ausgeübt werden muss. Dies erfordert demnach eine Arbeit:

$$A = TJl \,.\, vt \quad \cdots\cdots\cdots \quad 2)$$

*) Da nämlich der Stromleiter von der Länge l mit dem Strome J auf den Magnetpol m im senkrechten Abstande r eine rechtwinklig auf l und r gerichtete Kraft $= \frac{lJm}{r^2} = lJT$ ausübt, so muss auch umgekehrt der festgehaltene

Aus 1) und 2) folgt aber

$$E = \frac{A}{Jt} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

und mit Beiziehung des Ohm'schen Gesetzes für den Widerstand des Leiters:

$$W = \frac{A}{J^2 t} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4)$$

Dies ist die Ableitung nach Weber, die sich auf die Induction gründet. Die andere Ableitung stützt sich auf das Gesetz von Joule, welches lautet:

$$A = J^2 Wt \quad \ldots\ldots\ldots \quad 5)$$

woraus sofort folgt:

$$W = \frac{A}{J^2 t}, \text{ wie oben unter 4),}$$

und mit Beiziehung des Ohm'schen Gesetzes:

$$E = \frac{A}{Jt}, \text{ wie oben unter 3).}$$

Aus dem Gesetz der Erhaltung der Energie folgt nämlich, dass dieselbe Energie A, welche wir in Form von Arbeit aufwenden mussten, um den Leiter zu bewegen und hierdurch den Inductionsstrom zu erzeugen, auch wieder in Form einer äquivalenten Wärme frei werden muss, wenn die Stromenergie keine andere Umwandlung erfährt. Folglich ist die Grösse A in den Formeln 2) und 5) identisch, und da wir für Widerstand und elektromotorische Kraft nach beiden Ableitungen gleiche Ausdrücke erhalten, so müssen auch die zu Grunde liegenden Einheiten identisch sein.

194 **Gesetz von Lenz; Bewegung eines begrenzten Leiters durch einen Magnet und umgekehrt.** Im §. 190 bereits haben wir einer Beziehung Erwähnung gethan, welche aus dem Princip der Erhaltung der Energie folgt und welche Lenz allgemein für alle Inductionsströme, mögen sie durch relative Bewegungen zwischen Magneten und Stromleitern oder von Stromleitern unter sich hervorgebracht werden, ausgesprochen hat. Wir können das Gesetz von Lenz folgendermaassen formuliren:

I. Der Strom, welcher durch eine Bewegung entsteht bringt selbst die entgegengesetzte Bewegung hervor.

II. Die Bewegung, welche durch einen Strom entsteht, bringt selbst den entgegengesetzten Strom hervor.

Pol auf den Leiter eine ebenso grosse bewegende Kraft in entgegengesetzter Richtung ausüben (§. 121). Vom Erdmagnetismus ist hier abgesehen.

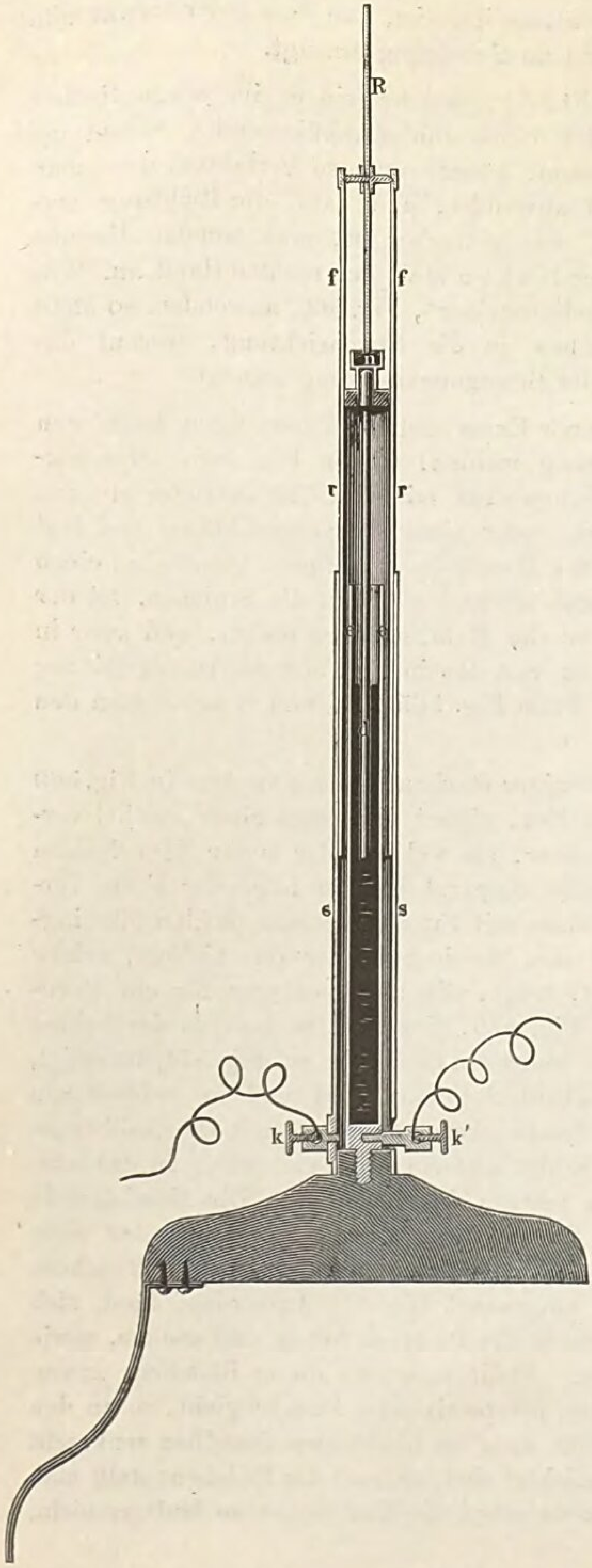
Es folgt aus diesen beiden Sätzen, dass jede Bewegung einen Widerstand erfährt, indem sie einen Strom inducirt, und dass jeder Strom eine Schwächung erfährt, indem er eine Bewegung erzeugt.

Um die Bewegungsrichtung, welche einem im magnetischen Felde befindlichen Leiter durch einen ihn durchfliessenden Strom gegeben wird, voraus zu bestimmen, könnte man so verfahren, dass man die im §. 191 gegebene Regel anwendet, und dann die Richtung entgegengesetzt nimmt. Oder, was einfacher ist, man wendet dieselbe Regel, aber mit Benutzung der linken statt der rechten Hand an. Will man den „automatischen Inductionszeiger", Fig. 566, anwenden, so stellt man einfach das Kupferstäbchen in die Stromrichtung, worauf das Schwanzende des Pfeiles die Bewegungsrichtung anzeigt.

Um das Vorgetragene durch Experimente zu bestätigen, kann man die nämliche Versuchsanordnung wählen, wie in Fig. 565. Man verbindet die Klemmen der Schienen statt mit dem Galvanometer mit den Polen einer kräftigen Batterie (oder einer Dynamomaschine) und legt als Stromleiter statt des an der Handhabe befestigten Querstabes einen leichten cylindrischen Metallstab (Röhre) quer auf die Schienen. Ist der Magnet stark genug, so kommt der Metallstab ins Rollen, und zwar in der entgegengesetzten Richtung mit den in Fig. 565 am Handgriffe angedeuteten Pfeilen. Für die Fälle Fig. 565 2, 4 und 6 muss man den Magnet senkrecht stellen.

Um diese Versuche mit weniger starken Strömen an dem in Fig. 569 dargestellten Apparate anzustellen, eignet sich statt eines parallel verschiebbaren ein rotirender Leiter, als welcher der unter dem Namen Barlow's Rädchen bekannte Apparat hier in folgender Form Verwendung finden kann. Auf einer mit Fuss versehenen hohlen Messingsäule *ss*, Fig. 574 (a. f. S.), ist eine Messingröhre *rr* verschiebbar, welche am oberen Ende Fortsätze *ff* trägt, die als Axenlager für ein sternförmiges Kupferrädchen *R*, Fig. 575, dienen. Im Inneren der hohlen Messingsäule ist von letzterer isolirt ein Eisenrohr *ee*, Fig. 574, befestigt, welches zum Theil mit Quecksilber gefüllt wird und in welches ein Stahldraht *d* eintaucht, auf dessen oberes Ende ein mit Quecksilber zu füllendes Stahlnäpfchen *n* in Schiffchenform aufgesetzt wird. In das letztere Quecksilber tauchen die Spitzen des Rädchens. Die Messingsäule und die Eisenröhre sind mit Klemmschrauben *k*, *k'* versehen. Auf diese Weise lässt sich ein Strom zuführen, welcher von der Axe des Rädchens zum Quecksilbernapfe oder umgekehrt fliesst. Ausserdem lässt sich ohne Unterbrechung des Stromes das Rädchen heben und senken, sowie um eine verticale Axe drehen. Stellt man nun dieses Rädchen, wovon Fig. 576 (a. S. 701) noch eine perspectivische Ansicht giebt, so an den Magnet des Apparates, Fig. 569, dass die Kraftlinien desselben senkrecht auf die Ebene des Rädchens gerichtet sind, so läuft das Rädchen; stellt man dagegen das Rädchen parallel zwischen die Kraftlinien, so läuft es nicht.

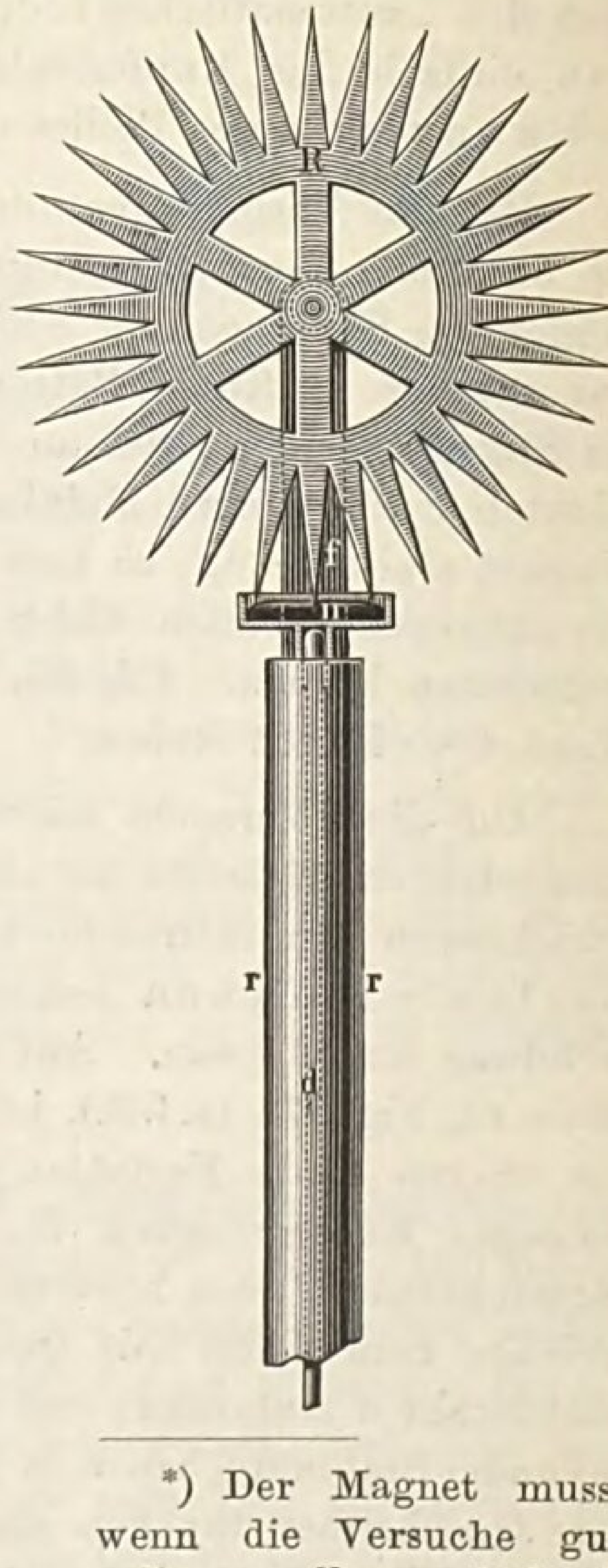
Fig. 574.



Dabei ist es möglich, dem bewegten Leiter alle möglichen relativen Stellungen zum Magnete zu geben *).

Die gewöhnliche Form des Barlow'schen Rädchen ist in Fig. 577 ab-

Fig. 575.



*) Der Magnet muss, wenn die Versuche gut gelingen sollen, recht kräftig, der Strom genügend stark, aber doch nicht stärker als 8 bis 10 Amp. sein, da sonst leicht die Spitzen des Rädchens geschmolzen werden. Das Quecksilber im Näpfchen ist zu wechseln, falls es durch elektrische Funken oxydirt worden ist.

gebildet. Die Kraftlinien gehen dabei vom Nordpole des liegenden Hufeisenmagnets zum gegenüberliegenden Südpole desselben. Der Strom geht senkrecht auf diese Kraftlinien von der Axe des Rades durch die abwärts gerichteten Speichen des Rades in das Quecksilber oder umgekehrt. Umkehrung des Stromes kehrt demnach auch die Rotationsrichtung um. Ersetzt man den Stahlmagnet durch einen Elektromagnet, welcher durch denselben Strom geladen wird, so wird durch Umkehrung des Stromes auch das Zeichen der Pole umgekehrt, weshalb die Rotationsrichtung wiederum dieselbe bleibt wie vorher. Verbindet man die Klemmschraube statt mit den Polen eines Elementes mit den Klemmen eines Galvanometers und dreht das Rädchen, so kann man den Inductionsstrom nachweisen.

Fig. 576.

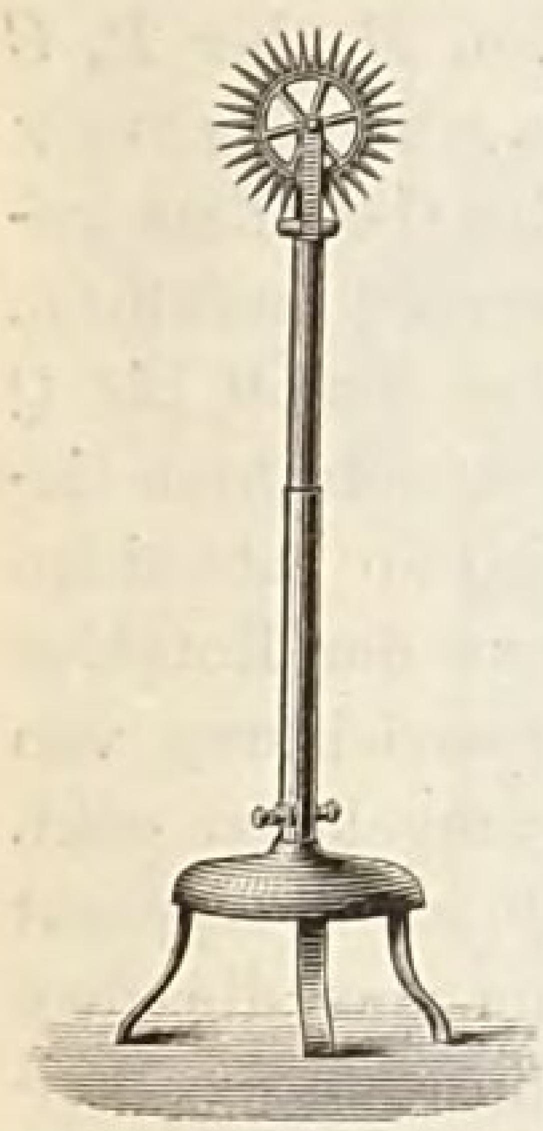
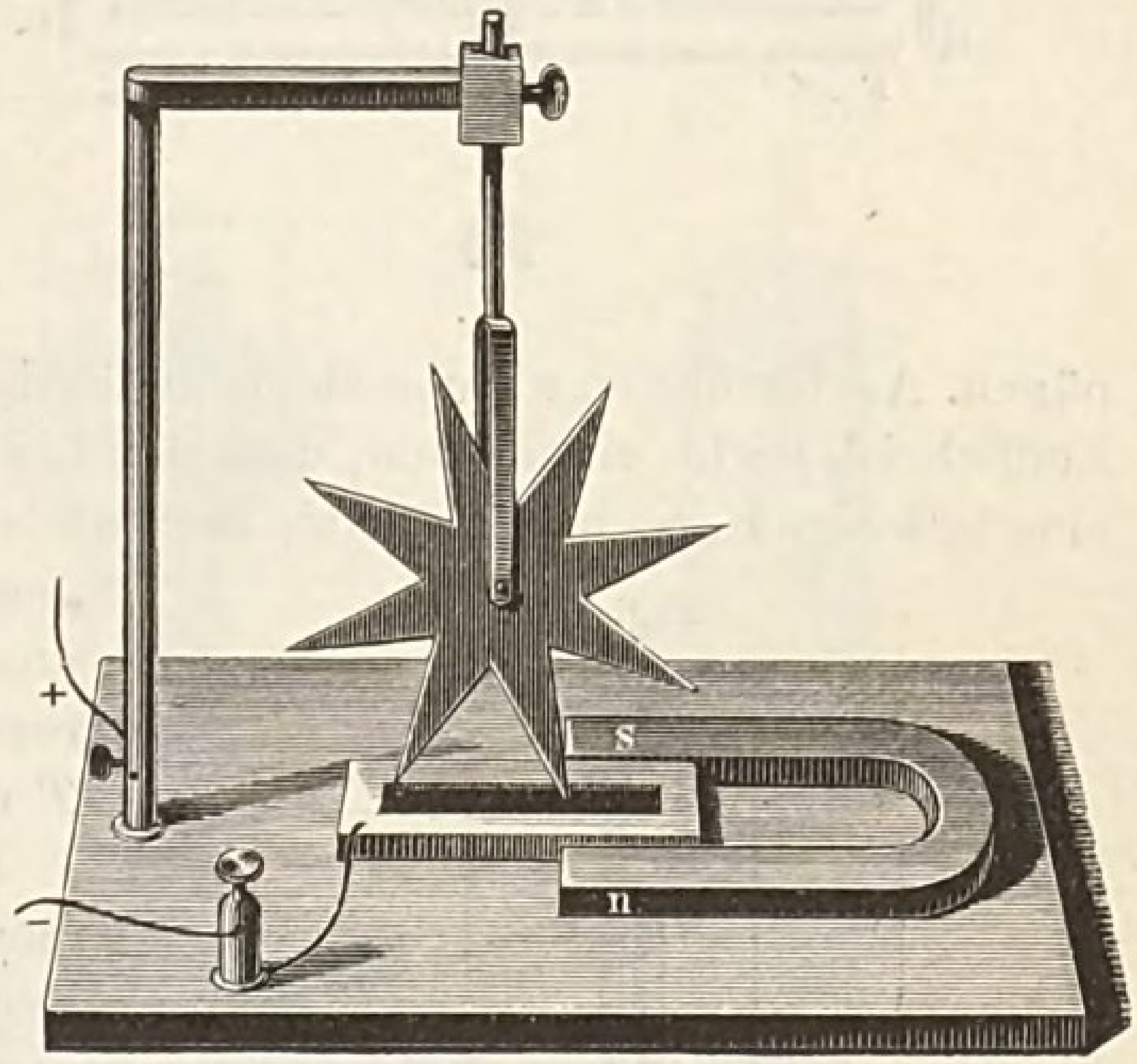


Fig. 577



Weitere Apparate zur Demonstration specieller Fälle der Bewegungserscheinungen von Stromleitern im magnetischen Felde wollen wir in den folgenden Paragraphen beschreiben.

Rotation eines Stromleiters um einen Magnet und umgekehrt. 195 Die in Fig. 565 dargestellten Versuche und die angegebene Regel über die Richtung des Inductionsstromes lassen uns sofort übersehen, was für Ströme in vier geraden Leitern, AB, FE, CD und GH, Fig. 578 (a. f. S.), entstehen müssten, wenn wir uns dieselben um eine mit der Magnetaxe zusammenfallende Rotationsaxe xx' so gedreht denken, dass die Bewegung oben nach vorn, also im unteren Theile nach rückwärts stattfindet. In jedem Leiter würden die beiden Hälften desselben entgegengesetzte Stromwirkung erhalten. Es könnte also auch, wenn die vier Leiter zusammenhingen, kein continuirlicher Inductionsstrom innerhalb derselben entstehen und es könnte daher auch umgekehrt durch einen in dem Rahmen kreisenden Strom keine Bewegung

bewirkt werden. Dasselbe könnte auch dann nicht geschehen, wenn wir den Strom bei *P* zuführen und bei *Q* abführen würden. Wohl aber würde sowohl ein continuirlicher Inductionsstrom durch die Rotation als auch eine continuirliche Rotation des Leiters um die Magnetaxe durch einen Strom zu erhalten sein, wenn wir die Zuführungsstellen des letzteren bei *M* und *R*, die Abführungsstellen bei *P* und *Q* anbringen würden. Offenbar würde dann auch schon die Hälfte des Gesammtleiters von *M* über *B*, *C Q D E* bis *R*, oder das Stück von *M* über *B*, *C* bis *Q*, ja schon das Stück *MB* oder *C Q* allein genügen. Auch könnten wir den Strom am Ende *T* eines Leiters *T U* zuführen. Endlich ist leicht einzusehen, dass der Leiter von *T* oder von *M* bis *Q* eine beliebige Form haben dürfte, da er stets die in diesem Quadranten liegenden Kraftlinien so schneiden muss, dass die aus der Rotation resultirende Stromrichtung von *T* nach *Q* oder umgekehrt geht.

Fig. 578.

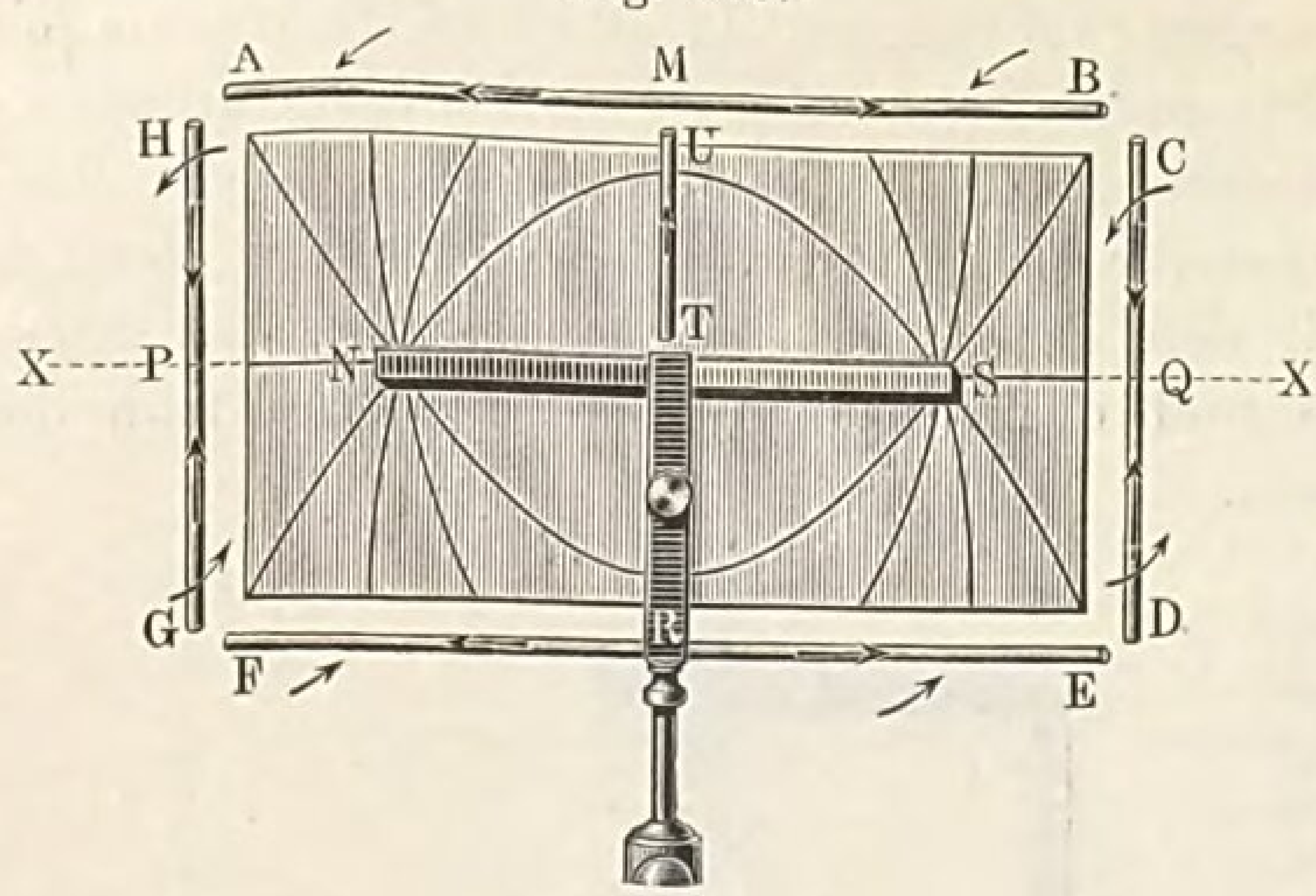
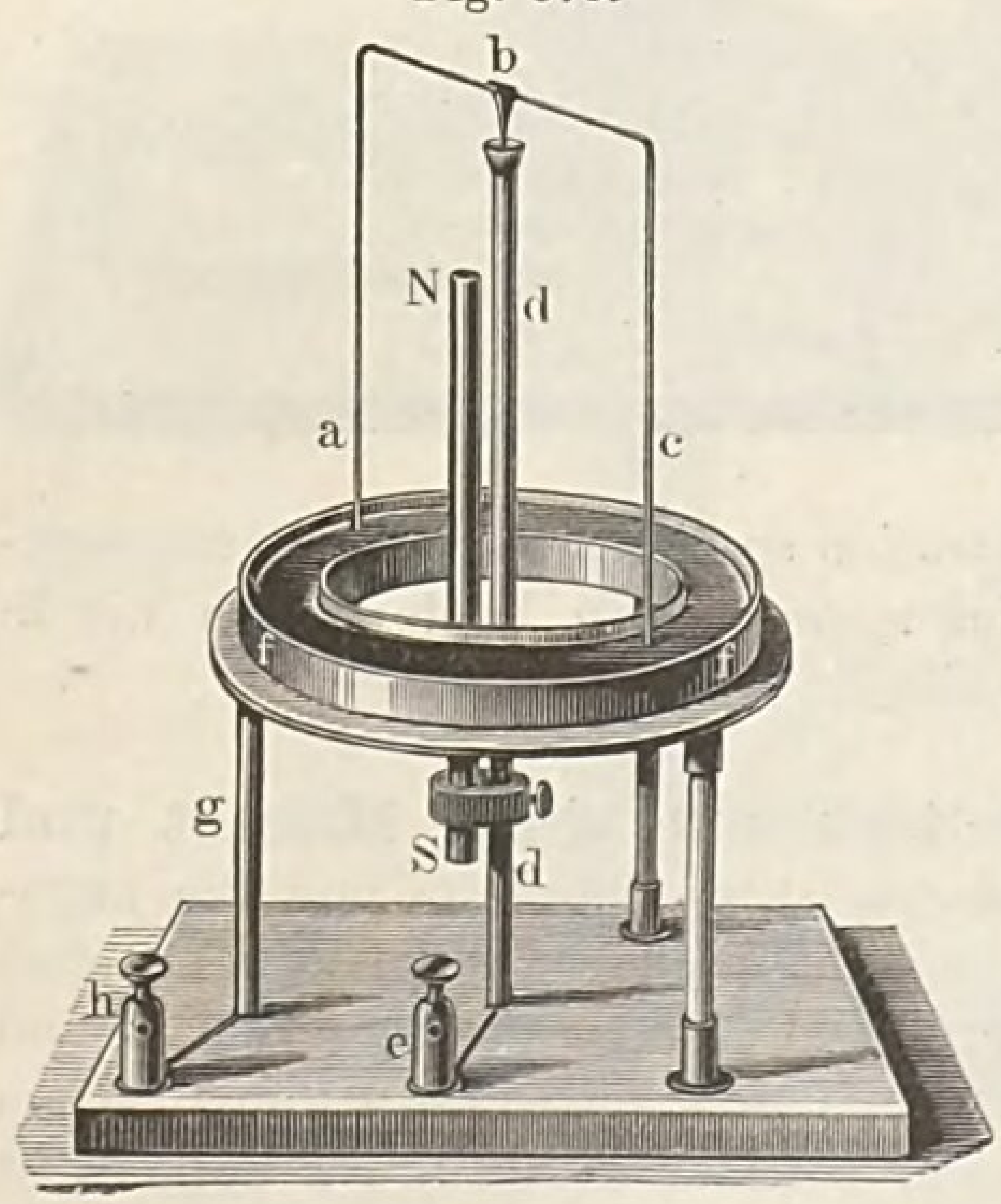


Fig. 579 stellt einen Apparat dar, mit welchem man die eben besprochene Rotationserscheinung zeigen kann. Eine Metallsäule *dd*, welche unten mit der Klemmschraube *e* verbunden ist, trägt oben ein stählernes Quecksilbernäpfchen, in welches mittelst einer Stahlspitze der kupferne Drahtbügel *abc* eingesetzt ist. Die unteren Enden dieses Drahtbügels tauchen in eine Quecksilberrinne *f*, welche mit der Klemmschraube *h* leitend verbunden ist. Wird nun bei *h* der positive, bei *e* der negative Pol der Säule eingeschraubt, so geht der positive Strom in den Drahtarmen *a* und *c* in die Höhe, dann von beiden Seiten nach *b* und von da durch die Säule *d d* herab.

Fig. 579.



An der Säule *dd* ist eine Fassung angebracht, welche auf- und niedergeschoben werden und in beliebiger Höhe festgestellt werden

kann; sie trägt den kräftigen Stahlmagnet *NS*, unter dessen Einfluss der durchströmte Leiter in Rotation geräth.

Fig. 580 zeigt zwei Abänderungen dieses Versuches. Eine Hülse *aa* von Holz, ganz ähnlich der in der vorigen Figur und in gleicher Weise mit einer Rinne zur Aufnahme von Quecksilber versehen, ist auf einem Pol eines starken Hufeisenmagnets befestigt. In einer kleinen Vertiefung in der Mitte des Pols sitzt, von einer Stahlspitze getragen, ein Drahtbügel, dessen Enden in die Quecksilberrinne hinabhängen. In der Mitte ist dieser Drahtbügel mit einem Quecksilbernäpfchen versehen, in welches eine Drahtspitze eintaucht, die mit dem einen Pole der Stromquelle verbunden ist, während der von unten in das Quecksilber der Rinne

Fig. 580.

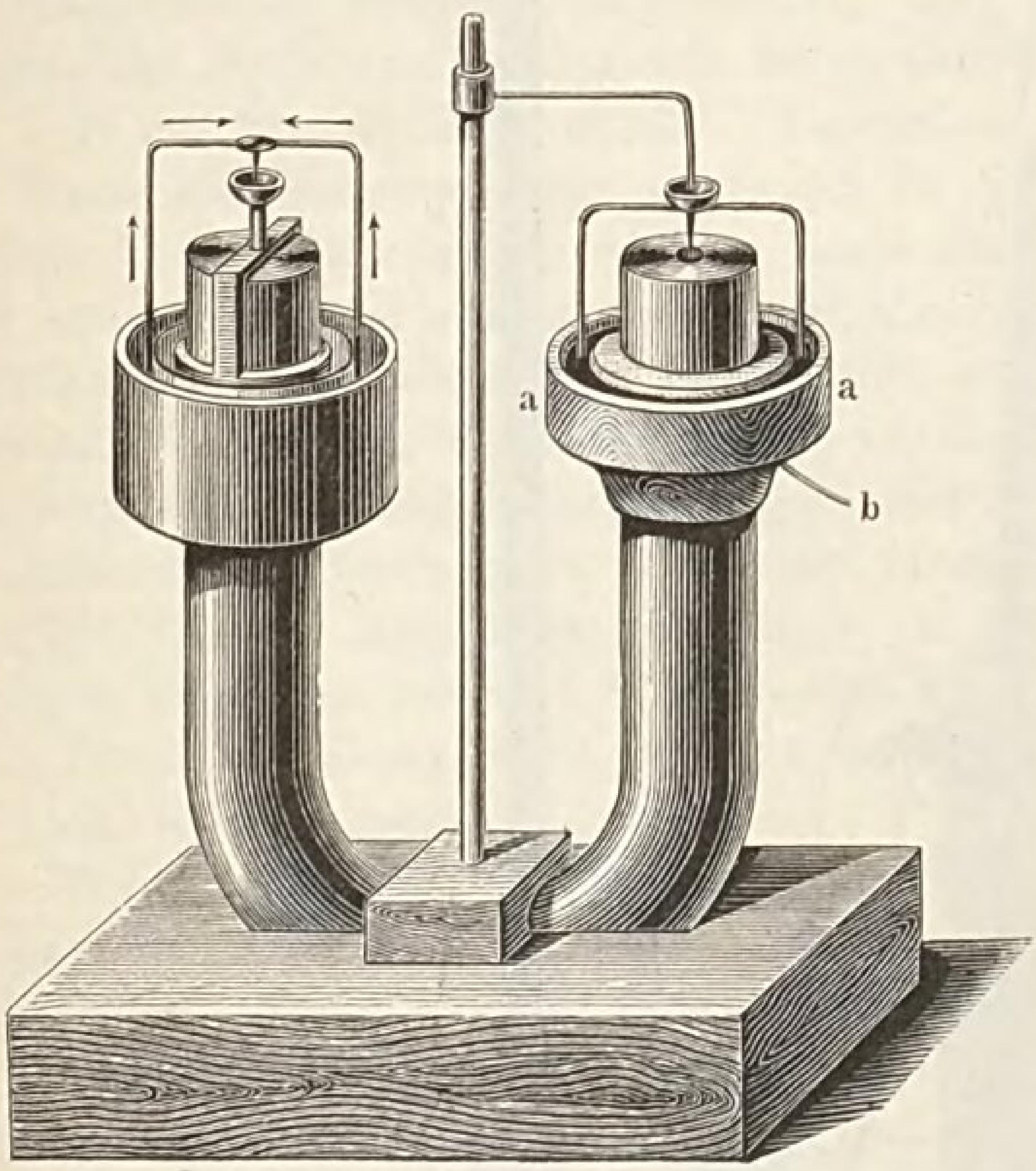
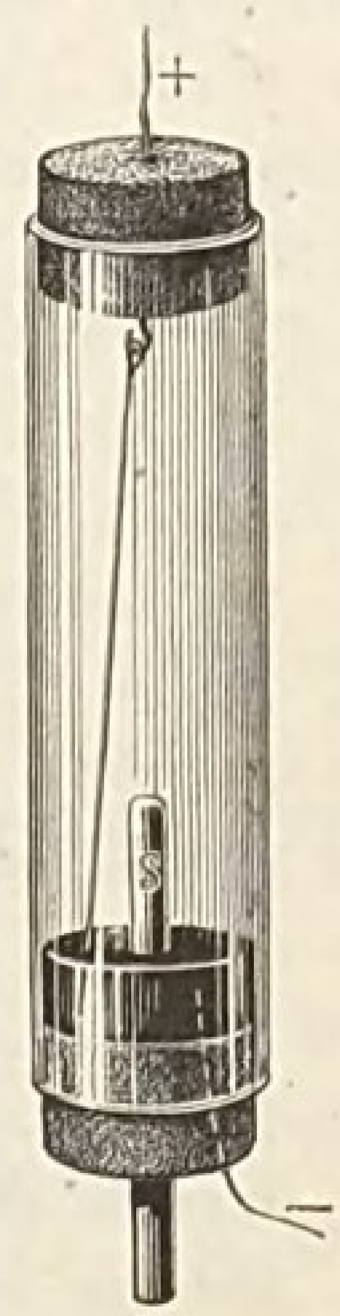


Fig. 581.



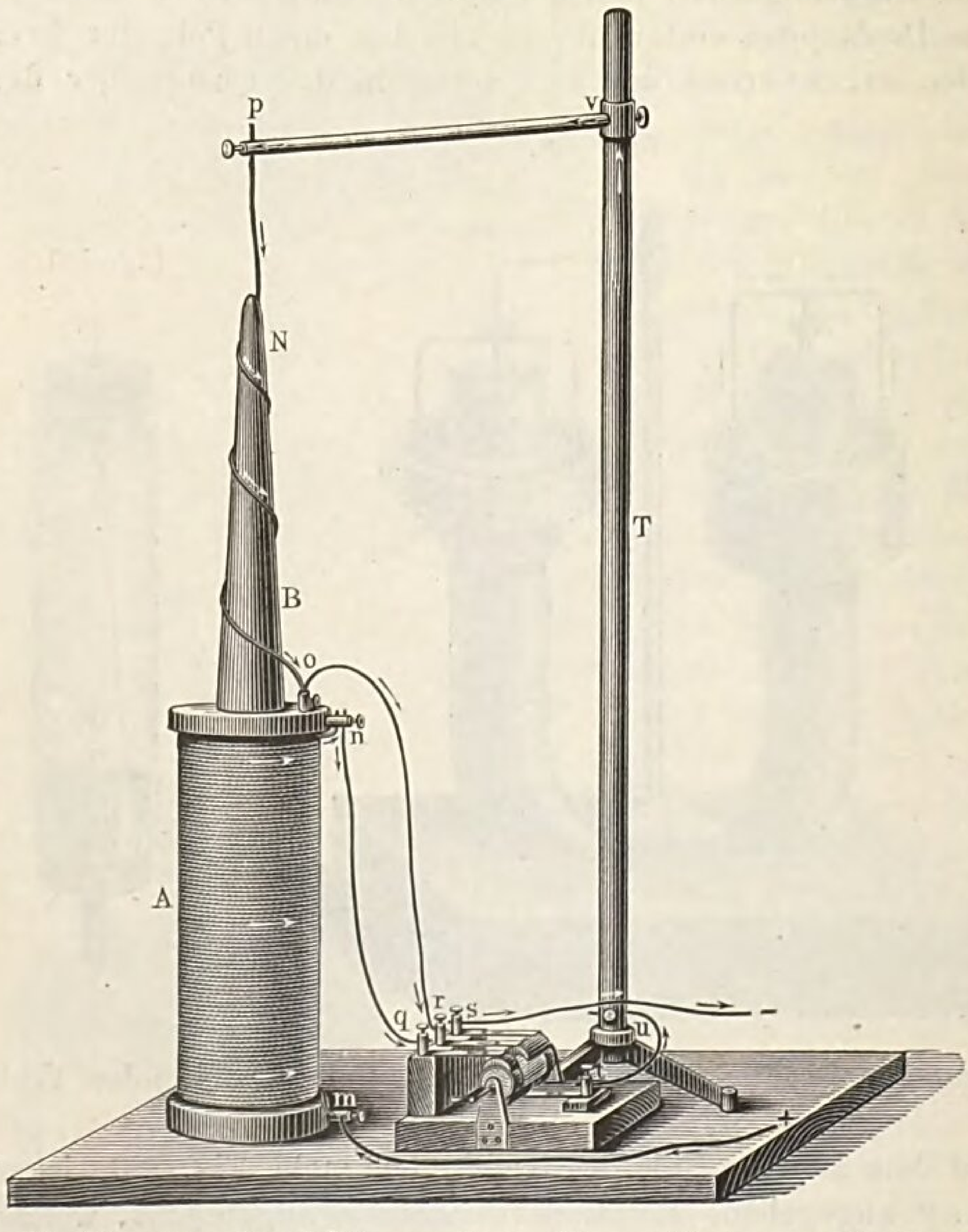
hineinragende Draht *b* mit dem anderen Pole in leitender Verbindung steht.

Auf dem anderen Pole des Hufeisenmagnets, Fig. 580, ist eine von Faraday angegebene Rotationsvorrichtung angebracht, welche selbst den Rheomotor bildet. Statt der hölzernen Rinne ist ein Gefäss von Zink über den Magnetpol geschoben, welches, durch zwei concentrische Cylinder und eine Bodenfläche gebildet, mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt wird. An der inneren Wand des Zinkgefässes ist ein Zinkbügel befestigt, welcher auf der oberen Fläche des Magnetpoles aufsitzt. Auf der Mitte dieses Bügels steht ein Kupferstäbchen, welches oben mit einem Quecksilbernäpfchen endet; in dieses Quecksilbernäpfchen ist mittelst einer Stahlspitze ein Bügel von Kupferdraht eingesetzt, welcher unten einen Ring von dünnem Kupferblech trägt, der in das saure Wasser des Zink-

gefässes hineinhängt. Es geht nun der positive Strom vom Zinkgefäss durch die saure Flüssigkeit zum Kupferstreifen, von diesem durch die Kupferdrähte erst in die Höhe, dann horizontal fort zum Quecksilbernäpfchen; es muss also die Rotation nach dem angeführten Gesetze eintreten.

In den beiden letztgenannten Fällen ist es jedoch nicht allein die Einwirkung des Magnets auf den im Drahte aufwärts gehenden Strom,

Fig. 582.



welcher die Rotation bewirkt, sondern diese rührt zum Theil auch von der Einwirkung des Magnetpols auf den horizontalen Theil des beweglichen Stromleiters her.

Es wurde oben bemerkt, dass der Leiter *abc* (Fig. 578) nicht parallel und senkrecht zur Magnetaxe geformt zu sein braucht, sondern eine beliebige Form haben könne.

Die Fig. 581 (a. v. S.) stellt einen sehr einfachen Apparat vor, bei welchem der Leiter eine diagonale Lage hat. Eine Glasröhre ist beiderseits durch einen Kork geschlossen, durch den unteren ist ein Magnet-

stab *ns* hineingesteckt, durch den oberen ein Kupferdraht, welcher an einer Oese ein bewegliches Drahtstück trägt. Letzteres taucht in das eingegossene Quecksilber, welchem der Strom von aussen zugeführt wird, und kommt durch diesen in Rotation, deren Richtung mit dem Strome wechselt, wenn der Stab *ns* ein Stahlmagnet ist; ersetzt man ihn durch einen Elektromagnet, der vom nämlichen Strome belebt wird, so wechselt die Rotationsrichtung nicht.

Sehr hübsch lässt sich die elektrodynamische Wirkung auf biegsame Leiter bei nebenstehendem Apparate, Fig. 582, zeigen. *A* ist eine Magnetisirungsspirale, *B* ein in dieselbe versenkter, in seiner oberen Hälfte conisch zulaufender, dick mit Schellack gefirnisster Eisenstab. Zwischen den Klemmen bei *o* und *p* ist ein aus vielen, sehr feinen Kupferdrähten lose zusammengedrehtes, daher sehr biegsames Kupferseil schlaff hängend eingespannt. Der Strom umkreist die Windungen der Spule und geht durch das erwähnte Seil zum Träger *T* und von dort zur Stromquelle zurück. Ausserdem ist ein Commutator *C* in der Weise eingeschaltet, dass der Strom im Kupferseil allein umgekehrt werden kann, während er in der Spule die Richtung behält. Sobald man einen genügend starken Strom circuliren lässt, wird das Kupferseil veranlasst, um den Magnet zu rotiren und sich dadurch spiralig aufzuwickeln. Kehrt man dann den Strom im Kupferseil um, so wickelt es sich von selber ab und in entgegengesetzter Richtung wieder auf. Die Firnissdecke des Eisenconus verhindert einen Nebenschluss. Selbstverständlich könnte man auch den Strom in der Spule allein umkehren. Dagegen kann das Ab- und Wiederaufwickeln nicht gelingen, wenn der ganze Strom umgekehrt wird, da dann mit der Stromrichtung im Kupferseil auch die Pole wechseln.

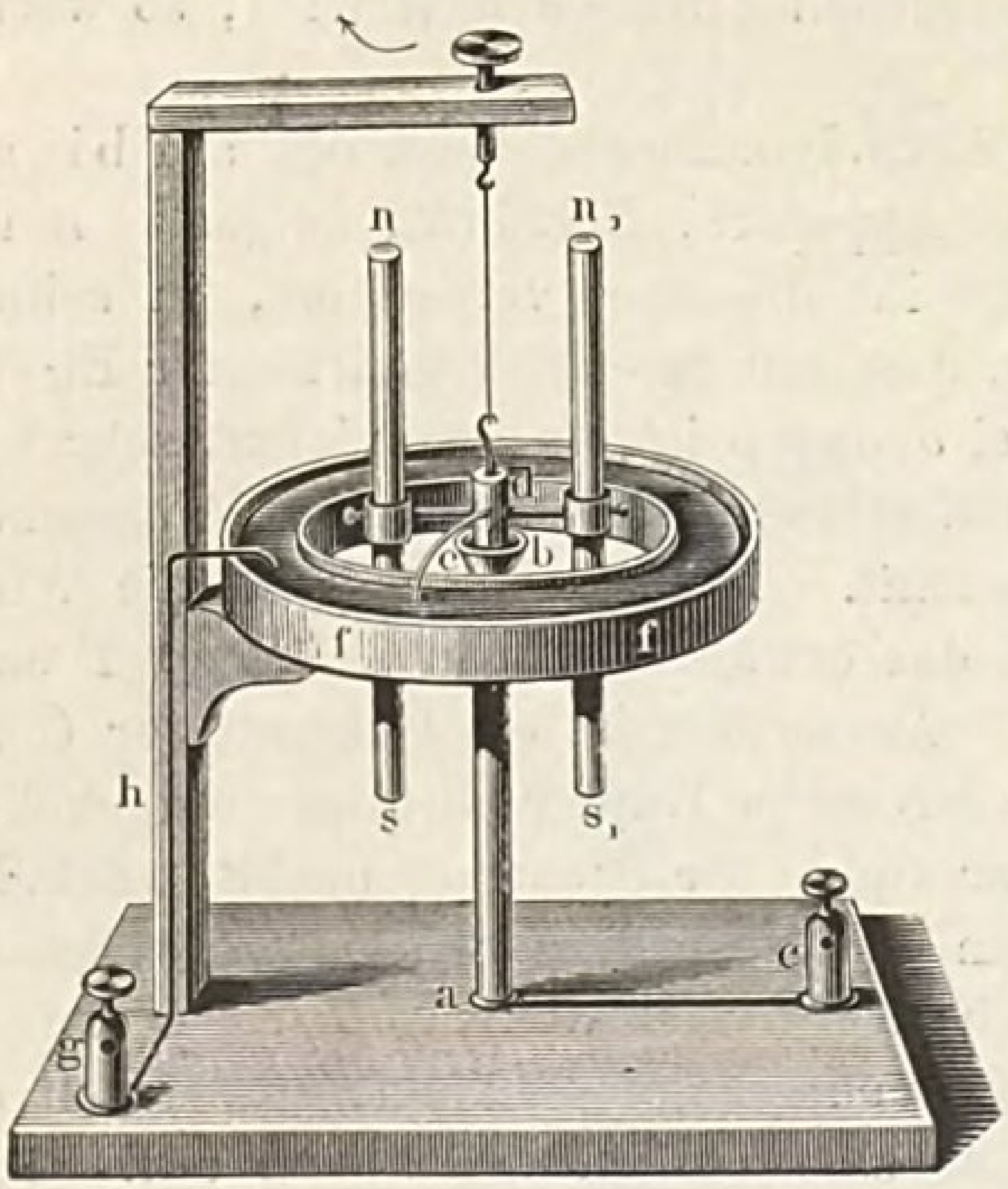
Wäre in Fig. 578, S. 702, der Leiter *MB* oder *MBCQ* feststehend, dagegen der Magnet um *MB* als Axe drehbar, so müssten ebenso Inductionsströme beziehungsweise Rotationen eintreten, da es sich ja nur um die relative Bewegung zwischen Leiter und Magnet handelt. Um dies zu zeigen, dient der Apparat Fig. 583 (a. f. S.). Der Metallstab *ab* endet oben mit einem Quecksilbernäpfchen *b*, während er unten mit der Klemmschraube *c* leitend verbunden ist. Von einem vertical über dem Quecksilbernäpfchen befindlichen Häkchen hängt der das Messingstückchen *d* tragende Faden herab, an welchem unten eine in das Quecksilber des Näpfchens *b* eintauchende Spitze befestigt ist, die aber nicht auf dem Boden des Näpfchens aufsitzen darf. An *d* ist ein horizontaler Draht *e* befestigt, dessen nach unten gebogenes freies Ende in das Quecksilber der Rinne *f* eintaucht, welches durch den Draht *h* mit der Klemmschraube *g* in leitender Verbindung steht. Ist nun in *c* der positive, in *g* der negative Poldraht des Elements eingeschraubt, so steigt der positive

*) Aehnliche Versuche sind mit Goldblättchen, Staniolblättchen, glühendem Platindraht etc. angestellt worden (Wiedemann, L. v. d. Elektr. Bd. 3. S. 189).

Strom im Stäbchen *ab* auf, gelangt von *d* durch den Draht *e* in das Quecksilber der Rinne *f*, um von da zur Klemmschraube *g* zu gehen.

An dem Messingstück *d* sind nun aber ferner zwei diametral gegenüberstehende horizontale Arme angebracht, welche mit Hülsen zur Aufnahme der Stahlmagnete *ns* und $n_1 s_1$ dienen. Wenn beide Magnete gleich gerichtet, also zwei gleichnamige Pole nach oben gekehrt sind, so rotirt das an dem Faden aufgehängte System um denselben, weil die Wirkung, welche der Strom in *ab* auf den einen Magnetstab ausübt, durch die Wirkung des Stromes auf den anderen Magnetstab unterstützt wird. Kehrt aber der eine Magnetstab seinen Nordpol, der andere seinen Südpol nach oben, so ist keine Rotation möglich, weil der Strom jeden der beiden Magnetstäbe nach entgegengesetzter Richtung zu bewegen strebt.

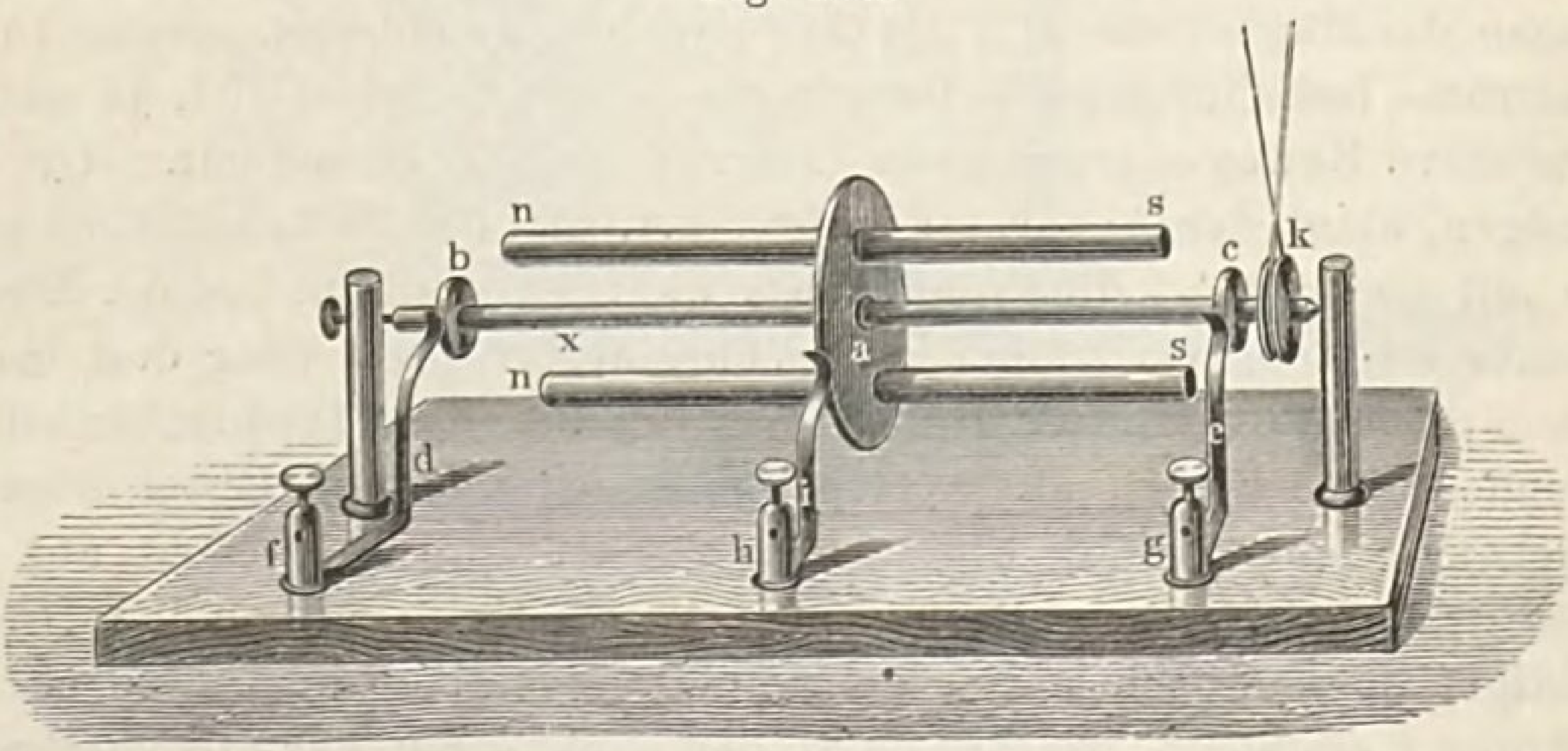
Fig. 583.



Die Richtung der Rotation hängt davon ab, ob die Nordpole oder die Südpole der Magnete nach unten gekehrt sind, und in welcher Richtung der Strom circulirt.

Die angegebene Regel giebt hierüber stets richtigen Aufschluss.

Fig. 584.



Zur Hervorbringung der entsprechenden Inductionswirkung ist der von Plücker und Fessel construirte Apparat, Fig. 584, geeigneter. Zwei Magnetstäbe *ns* sind parallel mit einander in einer kupfernen Scheibe *a* befestigt, welche in der Mitte einer den Magneten parallelen metallischen Axe *x* aufgesetzt ist. Diese Axe, welche mittelst eines um die Rolle *k*

geschlungenen Schnurlaufes in Rotation versetzt werden kann, trägt ferner die beiden Metallscheiben *b* und *c*. Gegen *b* drückt die mit dem Messingsäulchen *f* verbundene Metallfeder *d*. Auf *a* schleift in gleicher Weise die mit dem Messingsäulchen *h* verbundene Feder *i* und auf *c* die mit *g* verbundene Feder *e*. Sind nun *f* und *h* durch eine Drahtleitung verbunden, in welcher ein Multiplicator eingeschaltet ist, so zeigt derselbe durch die Ablenkung seiner Nadel einen Inductionsstrom an, sobald die Rotation um die Axe *x* bewerkstelligt wird. Dasselbe findet statt, wenn die Drahtleitung mit dem Multiplicator zwischen *h* und *g* eingeschaltet wird. Dagegen zeigt der Multiplicator keine Ablenkung, wenn die Enden der Drahtleitung, in welche er eingeschaltet ist, in die Messingsäulchen *f* und *g* eingeschraubt sind, wie dies nach den Bemerkungen im §. 195 wohl vorauszusehen war.

Die Rotation galvanischer Ströme unter dem Einfluss von Magneten ist zuerst von Humphry Davy entdeckt worden, welcher 1821 die Rotation des galvanischen Flammenbogens unter dem Einfluss eines Magnetpoles betrachtete. Durch die Bewegung der erhitzten Luft wird der Lichtbogen bestimmt, stets eine nach oben gewölbte Biegung anzunehmen, wie auch Fig. 1 auf Tab. I zeigt. Dieser Flammenbogen ist aber ein beweglicher Leiter, auf welchen der Erdmagnetismus eine richtende Kraft ausübt, und so kommt es, dass bei horizontal gegenüberstehenden Kohlenspitzen der Flammenbogen nie ganz vertical steht, sondern, je nach der Lage der Kohlenspitzen, bald nach der einen, bald nach der anderen Seite geneigt ist. Durch die Annäherung eines Magnetstabes kann man den Flammenbogen aus seiner durch den Erdmagnetismus bestimmten Stellung heraustreiben. Wird statt des einen Kohlenpoles ein Magnetpol angewendet, so dass der Flammenbogen sich zwischen Kohle und Stahl bildet, so rotirt der Flammenbogen um den magnetischen Stahlpol nach denselben Gesetzen, nach welchen überhaupt ein beweglicher Strom um einen festen Magnet rotirt.

Ein auf demselben Princip beruhendes Experiment von de la Rive werden wir später beim Inductionsapparate von Ruhmkorff kennen lernen.

Faraday entdeckte in demselben Jahre (1821) die Rotation eines starren Stromleiters um einen Magnetpol und gab dadurch den Schlüssel zur Erklärung der Erscheinung, welche am Flammenbogen beobachtet worden war. Im Jahre 1823 zeigte Davy, dass auch ein flüssiger metallischer Leiter, Quecksilber oder geschmolzenes Zinn, unter gleichen Umständen wie ein starrer in elektrodynamische Drehung versetzt werden kann; eine Thatsache, welche späterhin auch bei nicht metallischen flüssigen Leitern nachgewiesen wurde.

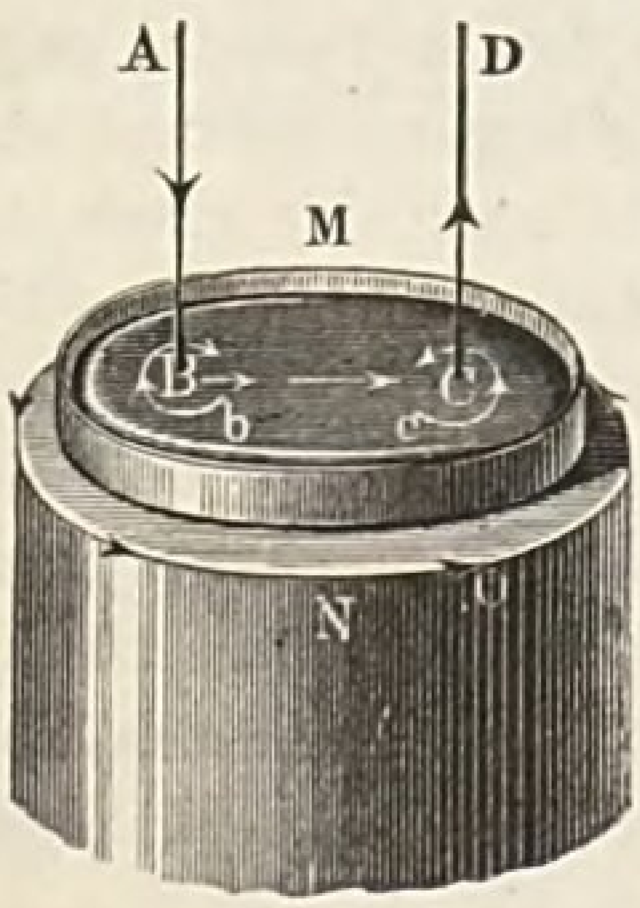
Davy stellte seine Versuche über die Rotation von Flüssigkeiten zuerst in der Art an, dass er in eine mit Quecksilber gefüllte Schale die beiden Poldrähte einer sehr kräftigen Volta'schen Batterie lothrecht

hinabgehen liess, und nun von unten her einen Magnetpol näherte, wie Fig. 585 zeigt. — Das Quecksilber rotirte um die beiden Drähte in entgegengesetzter Richtung.

Hierauf leitete er die beiden Drähte von unten her durch den Boden der Schale, und überzog dieselben so weit mit Siegellack, dass nur ihre zuvor abgeflachten und polirten Enden entblösst blieben und mit dem Quecksilber in Berührung kamen, von welchem sie nur etwa 2 mm hoch bedeckt wurden. Jetzt kam die Rotation des Quecksilbers auch ohne Magnet, nur nicht so stark, zum Vorschein, und über den beiden Drahtenden zeigte sich eine Hebung des Quecksilbers von 2 bis 4 mm, es bildeten sich also zwei Kegel, von deren Gipfel das flüssige Metall fortwährend nach allen Seiten abfloss. Durch die Annäherung eines Magnetpoles von oben her konnten diese Kegel bis zum Spiegel des Quecksilbers abgeflacht, ja sogar eine Vertiefung hervorgebracht werden, während die Masse zugleich schneller herumwirbelte.

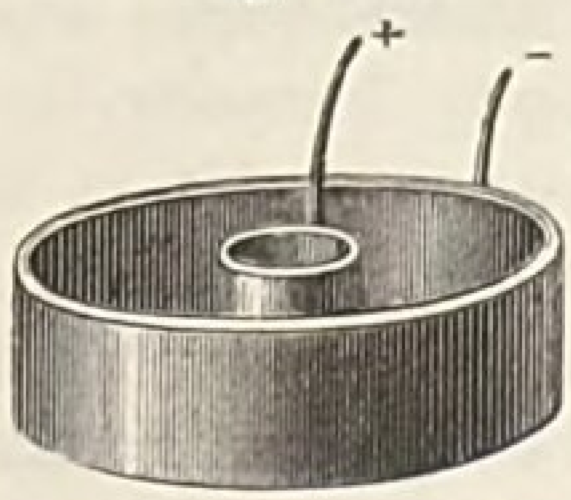
Die Depression des Quecksilbers, welche durch einen Magnetpol hervorgebracht wird, erklärt sich einfach durch die bei der rascheren Rotation kräftiger wirkende Centrifugalkraft.

Fig. 585.



Um diese Depression auch mit geringeren Mitteln hervorzubringen, verfuhr Poggendorff folgendermaassen: In ein Uhrglas oder Porcellanschälchen werden etwa 30 g Quecksilber gegossen und das Gefäss auf eine vertical stehende Drahtrolle gesetzt, die einen Eisenkern umschliesst; für diese Drahtrolle kann man natürlich auch den einen Schenkel eines U-förmigen Elektromagnets in Anwendung bringen, dessen Pole nach oben stehen. — In das flüssige Metall werden nun zwei Drähte von Eisen oder Platin eingetaucht, der eine nahe am Rande, der andere in der Mitte der runden Masse, und zwar der letztere so, dass er etwa nur 1 mm in das Quecksilber eintaucht. Werden nun die erforderlichen Verbindungen gemacht, um den Strom einer galvanischen Säule durch die Windungen der Magnetisirungsspirale und dann durch den einen der besprochenen Drähte in das Quecksilber ein-, durch den anderen Draht herauszuleiten, so tritt beim Schliessen der Kette sogleich eine lebhafte Rotation des Quecksilbers ein.

Fig. 586.



Im ersten Moment geschieht die Rotation um beide Drähte in entgegengesetzter Richtung, aber bald überwiegt die um den centralen Draht, wegen seiner vortheilhafteren Stellung, und nun hat man also nur eine einzige Rotationsrichtung. In Folge der durch diese Rotation erzeugten Centrifugalkraft senkt sich das Quecksilber in der Mitte, und

wenn der centrale Draht nicht zu tief eingetaucht ist, kommt bald ein Moment, wo das Quecksilber sich von ihm abtrennt, und dadurch eine Unterbrechung des Stromes bewirkt. Die Rotationsgeschwindigkeit des Quecksilbers nimmt nun allmälig ab, es steigt in der Mitte, bis es endlich wieder mit dem centralen Draht in Berührung kommt, wo dann die Rotation mit anfänglicher Geschwindigkeit von Neuem beginnt.

Die Rotation nicht metallischer flüssiger Leiter lässt sich am bequemsten in folgender Weise zeigen. Zwei concentrische Ringe von Kupferblech, deren grösserer ungefähr 5, deren kleinerer 1 cm Durchmesser hat, Fig. 586, sind durch einen wohlgefirnissten eingekitteten Boden von Holz zu einem Gefässe verbunden, welches mit einer leitenden Flüssigkeit, etwa mit einer Lösung von Kupfervitriol, gefüllt wird. Setzt man dieses Gefäss auf den einen Pol eines kräftigen Elektromagnets, verbindet man dann die eine Kupferwand mit dem positiven, die andere mit dem negativen Pole eines constanten Bechers, so beginnt alsbald die Rotation der Flüssigkeit.

Rotation eines Magnets um seine eigene Axe, unipolare Induction. Denken wir uns in dem Apparate, Fig. 584, S. 706, statt der beiden Magnete ein ganzes cylindrisches Bündel von Magnetstäben angebracht, so würde die Wirkung qualitativ dieselbe sein. Wir könnten uns dann dieses Bündel durch einen einzigen dicken Magnetstab ersetzt denken, dessen Axe zugleich als Stromleiter fungirt. Würde der Magnet seiner ganzen Axe entlang vom Strome in der nämlichen Richtung durchflossen sein, so könnte keine Rotation entstehen, wohl aber dann, wenn der Strom nur die Hälfte der Axe durchfliesst. Hiernach ist die Wirksamkeit des Apparates, Fig. 587 (a. f. S.), zu erklären. Der Magnetstab *ns* ist oben und unten mit Stahlspitzen versehen, welche so gefasst sind, dass er leicht um seine verticale Axe drehbar ist. Die untere Spitze taucht in ein Quecksilbernäpfchen ein, durch welches eine gut leitende Verbindung zwischen dem unteren Ende des Magnetstabes und der Klemmschraube *a* hergestellt wird. In seiner Mitte trägt der Magnetstab eine Hülse *c*, an welcher ein zur Quecksilberrinne *f* führender Kupferdraht befestigt ist. Der Strom kann also nur die untere Hälfte des Magnetstabes durchfliessen. 196

Fig. 588 (a. f. S.) stellt einen anderen zur Anstellung dieses Versuches sehr zweckmässigen Apparat dar. Auf dem Brettchen *MM* steht ein Cylinderglas, auf dessen Boden ein mit einer Stahlspitze versehenes Brettchen aufgekittet ist. Auf diese Spitze wird der Pol eines cylindrischen Magnets mit der kleinen Vertiefung gesetzt, die er noch vom Abdrehen her hat. Auf dem oberen Pole ist, wie man Fig. 589 deutlich sieht, eine Hülse *aa* von Holz oder Elfenbein aufgeschoben, welche ein Quecksilbernäpfchen bildet. Eine stählerne Schraube *b*, welche unten mit einer Spitze endet, die jener im Glase vertical gegenüber steht, wird nun so weit gegen das obere Kernloch des runden Magnets herunter-

geschraubt, dass derselbe zwischen beiden Spitzen noch etwas Spielraum hat, aber dieselben noch nicht verlassen kann. Ein Kupferstreifen *e* trägt einen nicht ganz geschlossenen, durch Federung gegen die Wände

Fig. 587.

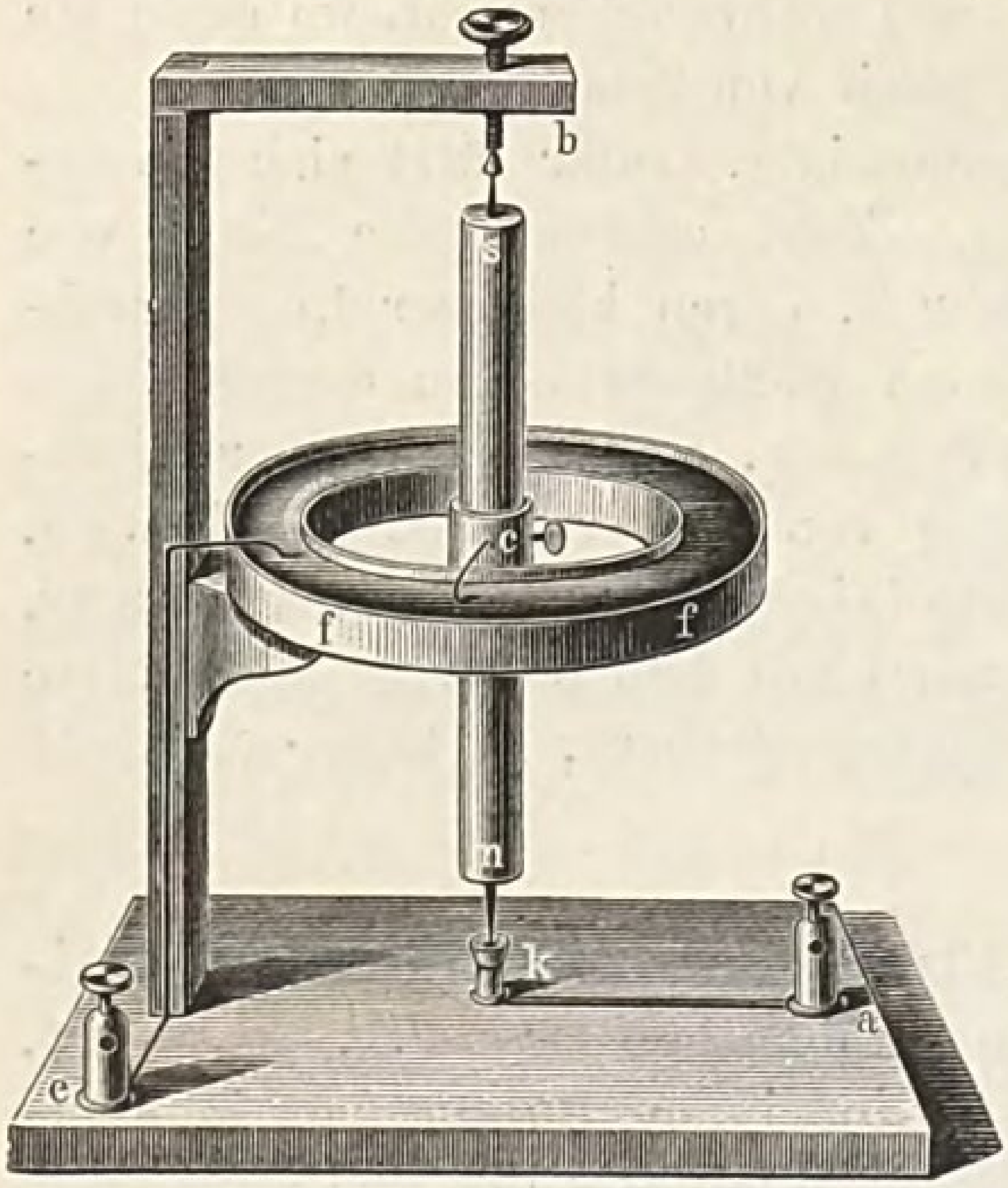
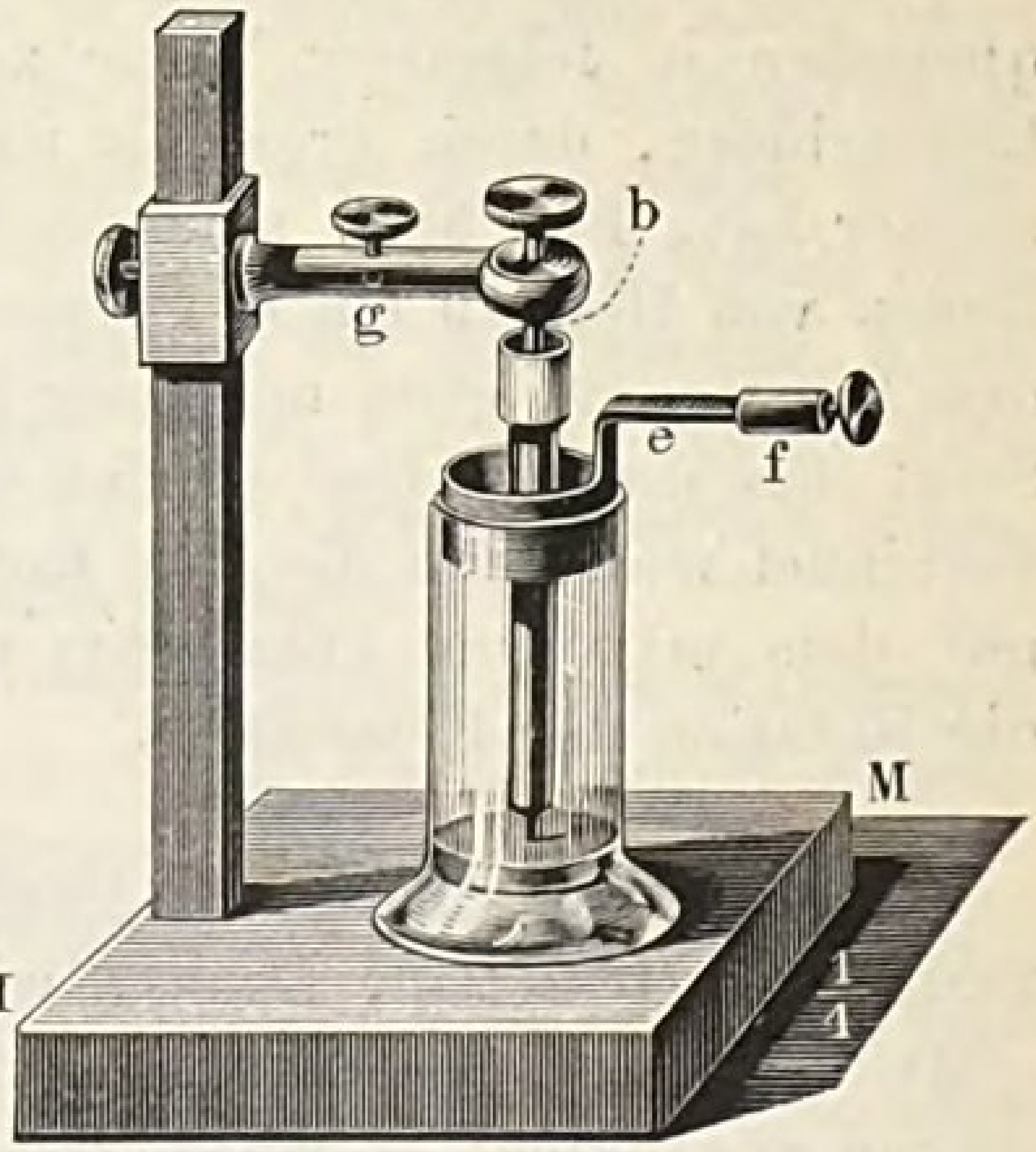
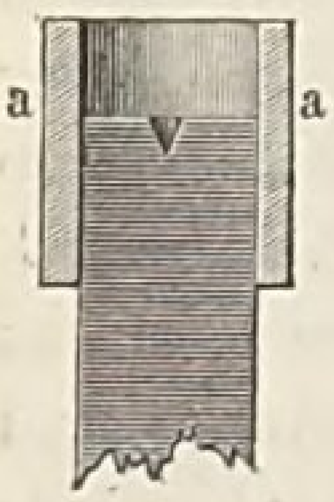


Fig. 588.



des Glases drückenden kupfernen amalgamirten Ring. In die Hülse *aa*, Fig. 589, giesst man nun etwas Quecksilber und in das Glas so viel, dass der untere Rand des Kupferringes in Quecksilber eingetaucht ist. Der Magnet kann sich nun zwischen den beiden Spitzen ungemein leicht drehen, weil sein Gewicht durch den Auftrieb des Quecksilbers getragen wird.

Fig. 589.



Wird der eine Poldraht eines constanten Bechers bei *f*, der andere bei *g* eingeschraubt, so beginnt die Rotation nach den bekannten Gesetzen.

Durch die Umkehrung dieses Versuches erhält man, wie schon Faraday gezeigt, ebenfalls einen Inductionsstrom. Der Apparat, welchen Weber anwendete, um durch einen um seine Axe rotirenden Magneten eine Induction hervorzubringen, welche er mit dem Namen der unipolaren Induction bezeichnet, ist Fig. 590 dargestellt. Ein cylindrischer Stahlmagnet *m* war an beiden Enden mit Spitzen versehen, welche in kleine Vertiefungen der eisernen Klammern *a* und *b* eingesetzt waren, wie man dies Fig. 591 deutlicher sieht. Diese Klammern waren auf das Brett aufgeschraubt, welches den ganzen Apparat trug. — In diese Klammern konnte man zwei grosse Magnete mit denjenigen Enden einschieben, welche den entgegenstehenden Polen des Magnets *m* entgegengesetzt waren und dadurch die Kraftlinien dieser Pole nach aussen drängten (S. 92, Fig. 80 b).

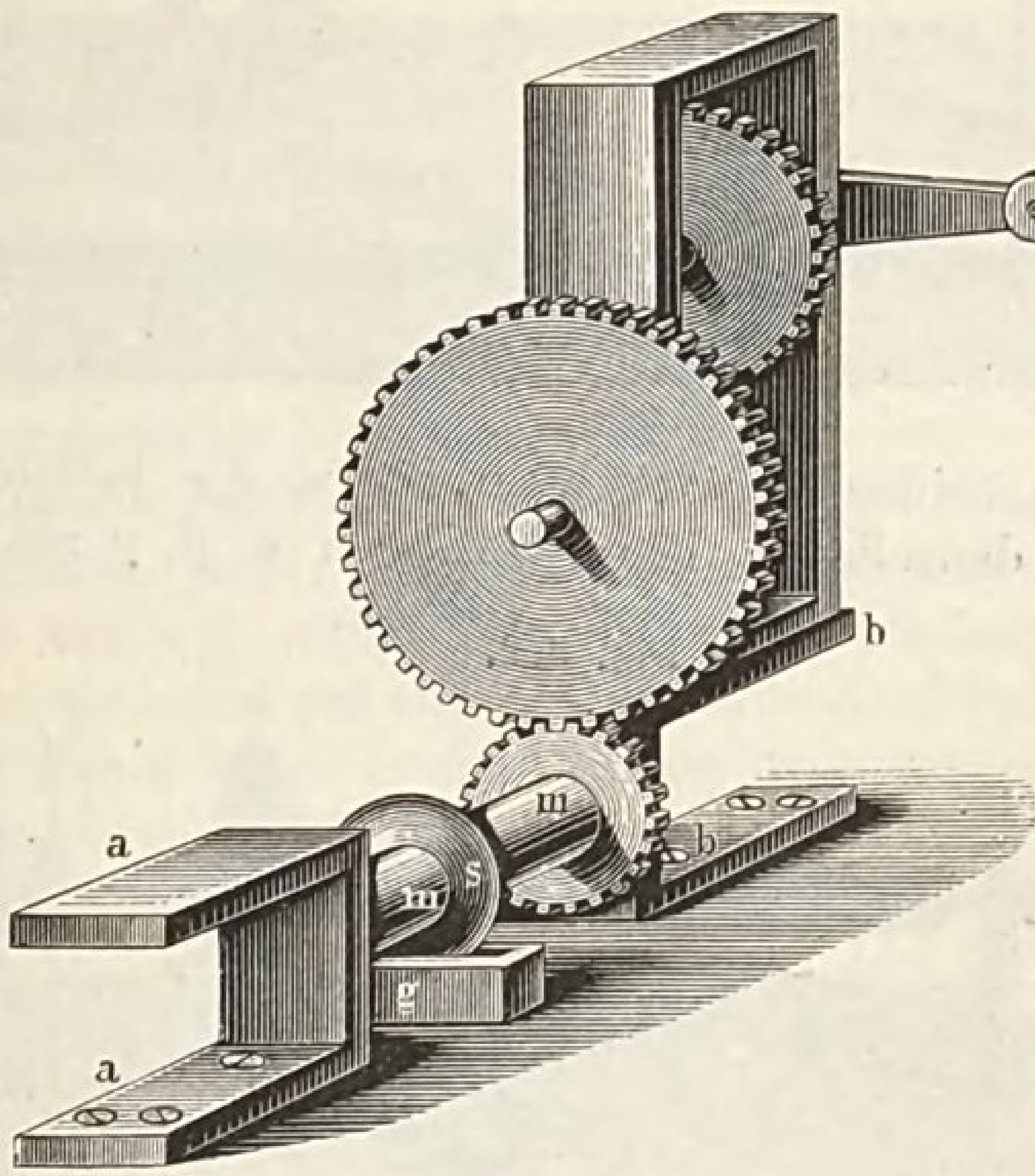
Die Umdrehung des Magnets *m* um seine Axe wurde durch ein Getriebe bewerkstelligt, dessen Einrichtung sich aus der Fig. 590 er-

giebt. Bei jeder Umdrehung der Kurbel machte der Stahlcylinder $8^4/_7$ Umdrehungen.

Ungefähr auf der Mitte des Stahlcylinders *m* war eine Messingscheibe *s* befestigt, deren unteres Ende in Quecksilber eintauchte, welches sich in dem Gefässe *g* befand.

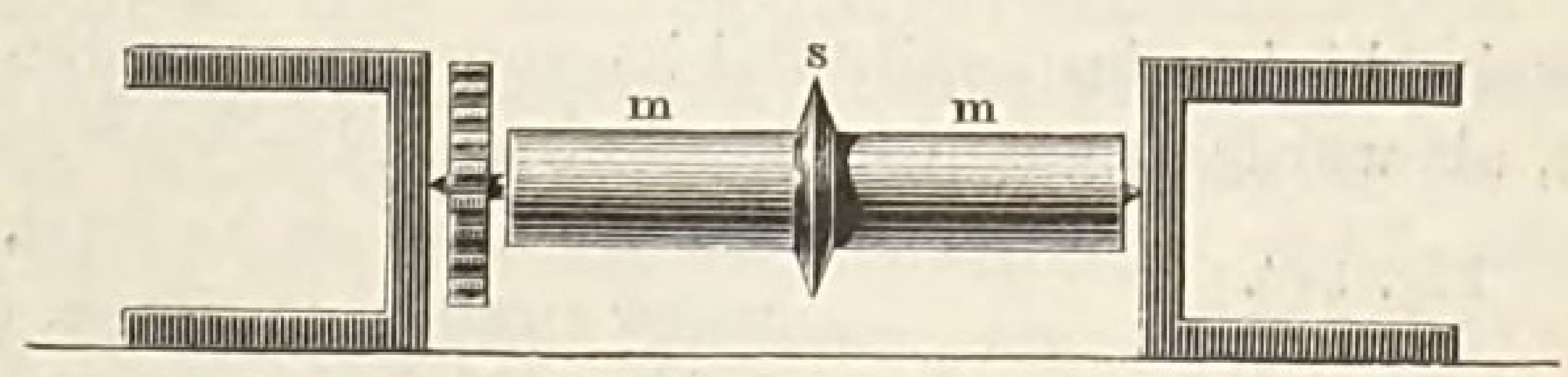
Wurde nun das eine Drahtende eines Multiplicators in das Quecksilbergefäss *g* getaucht, das andere an der Klammer *b* befestigt, so

Fig. 590.



wurde die Multiplicatornadel abgelenkt, sobald man die Kurbel zu drehen begann.

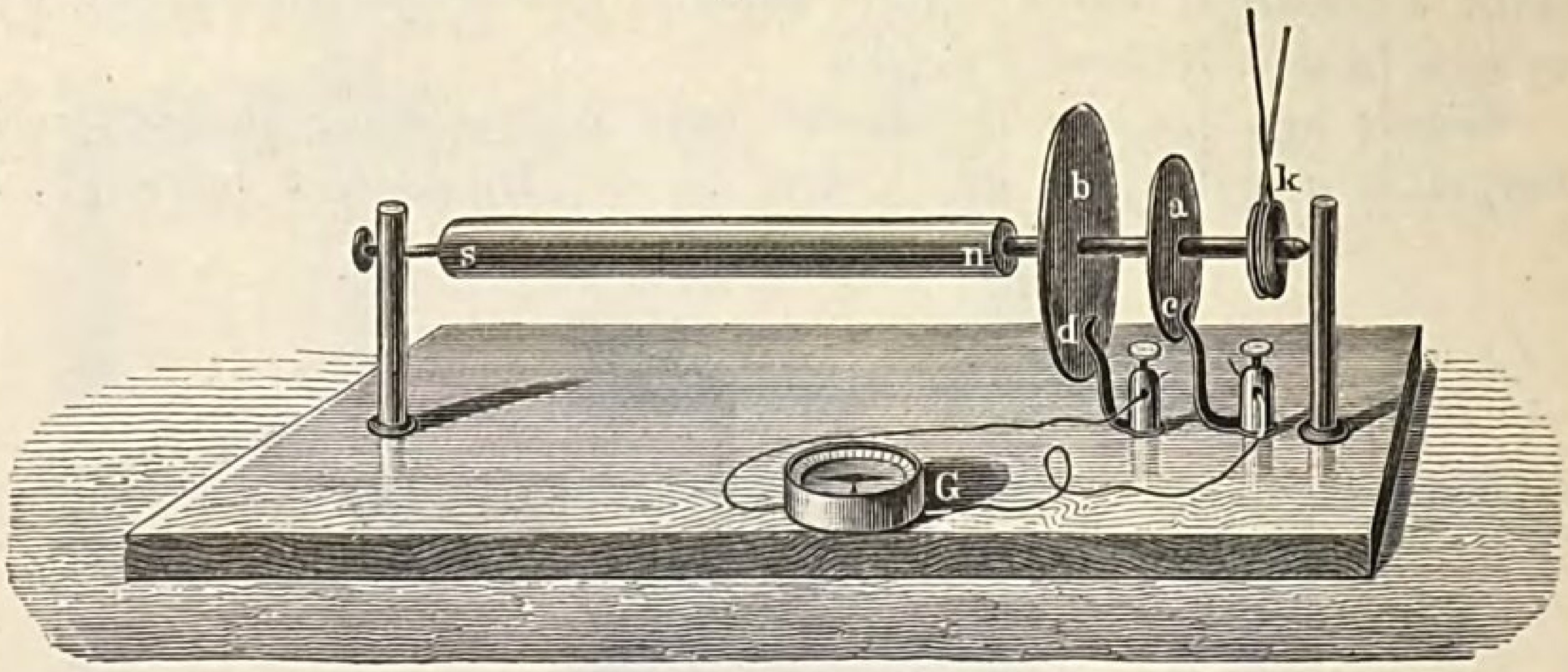
Fig. 591.



Recht lehrreich sind die Versuche mit den von Fessel construirten Apparaten, Fig. 592 und 593 (a. f. S.). An der Axe des mittelst Schnurlauf *k* in Rotation zu versetzenden Magnets *ns* sind zwei unter sich metallisch verbundene Kupferscheiben *a* und *b* befestigt, an welchen bei *c* und *d* Contactfedern schleifen. Letztere führen zu Klemmschrauben, welche einen Schliessungskreis mit Galvanometer enthalten. In diesem Kreise wird dann eine elektromotorische Kraft inducirt, welche genau so gross ist, wie sie in einem Leiter inducirt würde, der *c* mit *d* geradlinig verbindet. Die Leitung durch die Kupferscheiben und die Axe hindurch trägt zu dieser Inductionswirkung deshalb nichts bei, weil sie

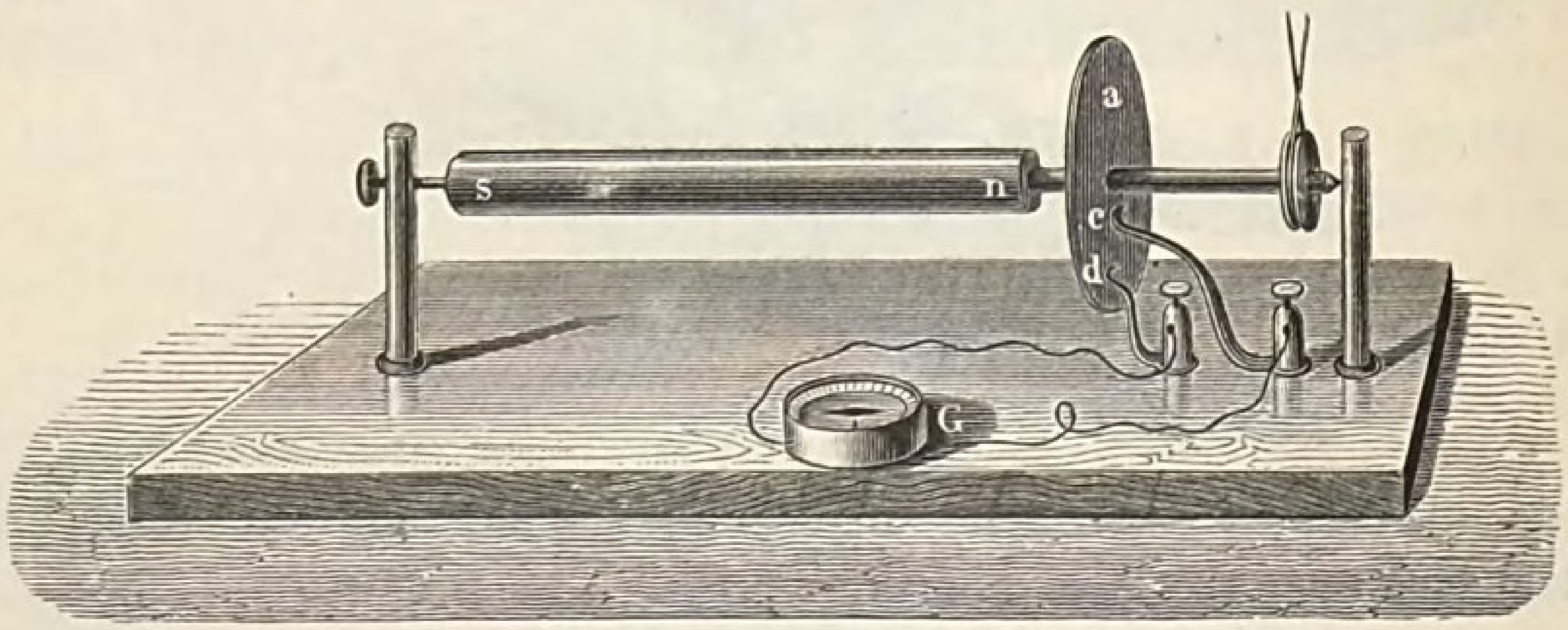
mit dem Magnet, also auch mit seinen Kraftlinien, rotirt, daher von ihnen nicht geschnitten werden kann. Man beachte nun noch die Fig. 594,

Fig. 592.



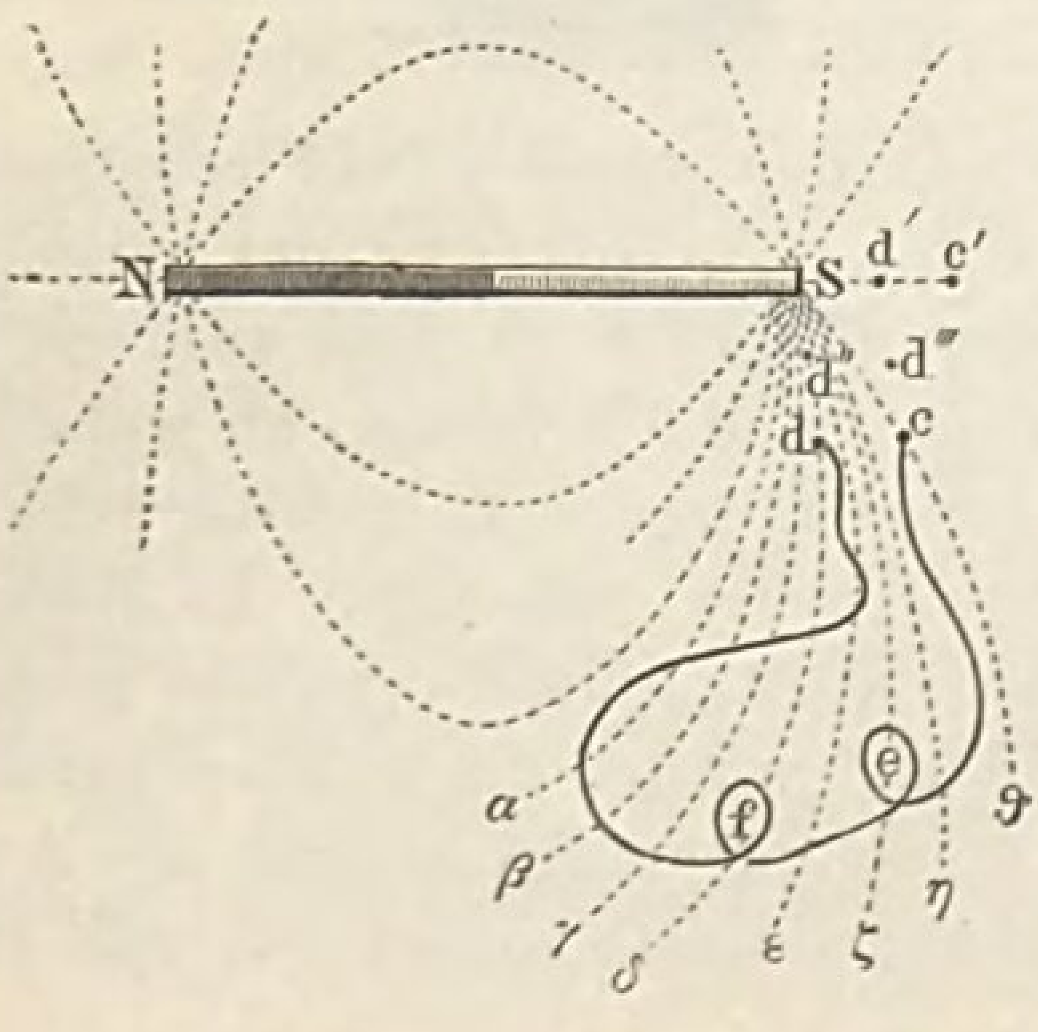
c und *d* seien die beiden Contactstellen, *cefd* die beliebig geformte Leitung zwischen denselben. Die Kraftlinien α, β, γ schneiden diese

Fig. 593.



Leitung je zweimal, aber das zweite Mal im entgegengesetzten Sinne, was ebenso wirkt, als würde sie gar nicht geschnitten. Die Kraftlinie δ schneidet die Leitung viermal, aber darunter zweimal im einen, die anderen beiden Male im entgegengesetzten Sinne, was sich wiederum aufhebt. Die zwischen *d* und *c* durchgehenden Kraftlinien schneiden die Leitung entweder einmal wie η, oder dreimal wie ε und ζ. Von diesen je drei Durchschneidungen heben sich je zwei auf, somit ist es so, als würden alle zwischen *d* und *c* durchgehenden Kraftlinien die Leitung einmal im selben Sinne schneiden. Die dadurch geweckte elek-

Fig. 594.



tromotorische Kraft, die ja nur von der Anzahl der Durchschneidungen abhängt, ist daher ebenso gross, wie wenn c mit d geradlinig verbunden wäre.

Würde man die Contactstellen auf eine einzige Scheibe, Fig. 593, entsprechend den Punkten c und d''' der Fig. 594 verlegen, so würde ebenfalls ein Inductionsstrom in dem Schliessungskreis zwischen den Klemmen inducirt werden mit ebenso grosser elektromotorischer Kraft, wie auf einem Leiter, der c mit d''' gerade verbindet. Würde man die Contactstellen auf die Axe nach c' und d' oder in eine beliebige Kraftlinie, z. B. nach d und d'', oder allgemein auf zwei Punkte der Rotationsfläche Einer Kraftlinie verlegen, so könnte kein Strom entstehen, weil keine Kraftlinien durchschnitten würden. Würde man endlich die Contactstellen c und d in einen Punkt zusammenlegen, so könnte auch kein Strom entstehen, weil der in sich geschlossene Leiter von jeder Kraftlinie nur eine gerade Anzahl von Durchschneidungen erfahren kann, die wegen entgegengesetzter Inductionswirkung sich aufheben müssen.

Ferner lässt die Betrachtung der Fig. 594 einsehen, dass, wenn man die Contactstellen längs der einen Scheibe aus der Lage c und d''' immer weiter von der Axe weg entfernt, dann einmal eine Lage derselben kommen muss, wo sie beide auf ein und dieselbe Kraftlinie fallen, wo also kein Strom entstehen kann, sowie, dass bei noch weiter getriebener Entfernung der Strom seine Richtung wechseln muss, da die Durchschneidung dann in entgegengesetztem Sinne erfolgt.

Endlich geht aus dieser Betrachtung hervor, dass durch axiale Rotation eines Magnets in einem abgesonderten, in sich geschlossenen, irgendwie geformten Leiter, von welchem kein Theil an der Rotation Theil nimmt, kein dauernder Inductionsstrom hervorgerufen werden kann.

Die vorgetragene Faraday'sche Theorie setzt, wie bemerkt, voraus, dass bei einem rotirenden Magnet auch die Kraftlinien mit rotiren*).

Inductions- und Bewegungserscheinungen zwischen Magneten und geschlossenen Stromleitern; Maxwell'sche Regel. 197 Von grösserer praktischer Bedeutung als die in den vorausgegangenen Paragraphen behandelten Bewegungs- und Inductionserscheinungen bei Einwirkung von Magneten auf begrenzte Leiter sind jene, welche in geschlossenen Leitern entstehen.

Der Stromleiter hat bei diesen Versuchen bald die Form eines Rechtecks, bald die eines Kreises oder einer mehrfach gewundenen

*) Eine von Edlund gegen die auf diese Annahme gegründete Faraday'sche Erklärung der unipolaren Induction gerichtete neue Theorie wurde durch Versuche von Fr. Exner (Wien. Akad. Ber. XCIV, 1886), sowie durch Arbeiten von E. Hoppe und Schwedoff widerlegt. Auf ein von J. Puluj (Sitzber. d. Wien. Akad. XCVII, 1888) beschriebenes Experiment über unipolare Induction, welches uns erst während des Druckes bekannt geworden, sei hiermit verwiesen, ebenso auf neuere Untersuchungen von Lecher.

Spirale oder einer Schraubenlinie. Man bedient sich dabei eines Apparates, welcher unter dem Namen des Ampère'schen Gestelles bekannt und in seiner einfachsten Ausführung in Fig. 595 bis 597 dargestellt ist.

Zwei verticale, auf einem Brett befestigte Säulen von Messing sind oben horizontal umgebogen und tragen die Quecksilbernäpfchen x und y, deren Mittelpunkte genau vertical unter einander stehen müssen. Die beiden Säulen sind nirgends in leitender Berührung. Unten sind sie etwas dicker, so dass man hier die Poldrähte einer Säule von drei bis fünf Zinkkohlenbechern einschrauben kann; dadurch wird das eine Quecksilbernäpfchen gewissermaassen zum positiven, das andere zum negativen Pole.

In diese Quecksilbernäpfchen werden nun Leitungsdrähte eingehängt, wie sie in Fig. 595 und 596 dargestellt sind. Da, wo sich die beiden Drahtenden zu berühren scheinen, sind sie durch eine isolirende Substanz

Fig. 595.

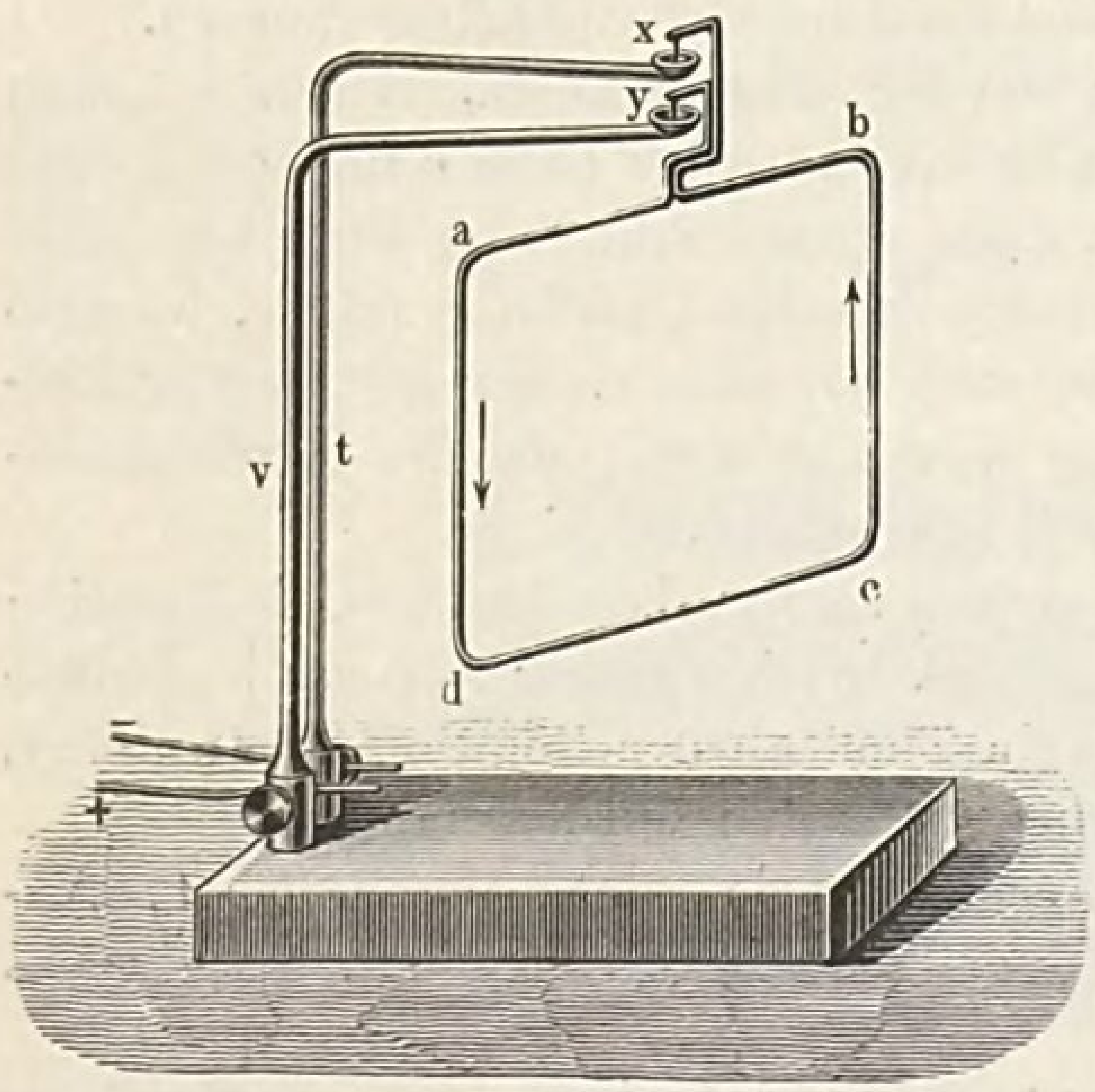
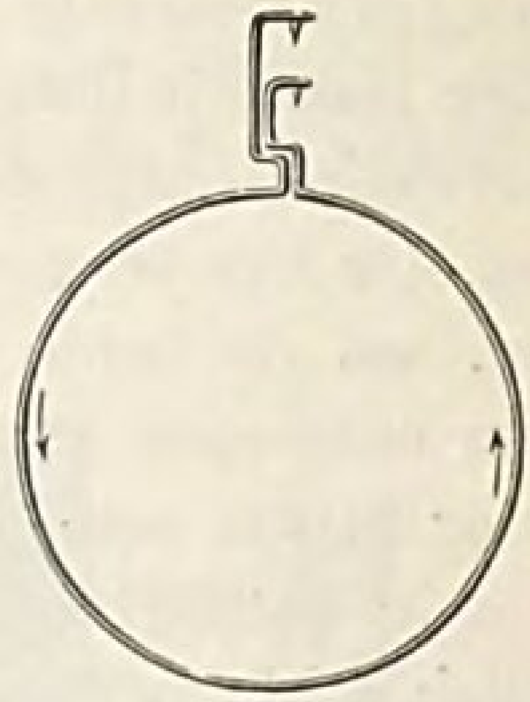


Fig. 596.



getrennt; sie sind oben umgebogen und mit Stahlspitzen versehen, die in die Näpfchen x und y, Fig. 595, eingetaucht werden. Die obere Spitze geht bis auf den Boden des Näpfchens und ruht hier auf einer kleinen Stahlpfanne, die untere Spitze taucht nur in das Quecksilber ein. Durch diese Aufhängung ist der Draht sehr leicht beweglich.

Nähert man dem so aufgehängten durchströmten Leiter einen Magnetstab, so wird er (der bewegliche Leiter), kräftig angezogen oder abgestossen, eine entsprechende Drehung um seine verticale Umdrehungsaxe erleiden.

Schon der Erdmagnetismus wirkt richtend auf den beweglichen durchströmten Leiter; wenn man ihn sich selbst überlässt, so stellt er sich so, dass seine Ebene rechtwinklig auf der Ebene des magnetischen Meridians steht, und zwar stets so, dass der positive Strom auf der Westseite aufsteigt oder, mit anderen Worten, dass der Strom, von der Südseite her betrachtet, in gleicher Weise kreist wie der Zeiger einer Uhr.

Da ein durchströmter kreisförmiger Leitungsdraht, Fig. 596, welcher um seine verticale Axe drehbar ist, sich rechtwinklig auf den magnetischen Meridian einstellt, so muss sich auch ein Schraubendraht (Solenoid), Fig. 597, an dem Ampère'schen Gestell aufgehängt und durchströmt, so einstellen, dass die Ebene der einzelnen Windungen gleichfalls rechtwinklig steht auf der Ebene des magnetischen Meridians, dass also die Axe des Solenoids in den magnetischen Meridian zu liegen kommt.

Es versteht sich von selbst, dass das Stäbchen, an welchem die einzelnen Windungen des Solenoids, Fig. 597, oben befestigt sind, aus einer isolirenden Substanz, also etwa aus Holz, besteht.

Ein solches Solenoid ahmt vollkommen die Declinationsnadel nach, es hat seinen Nord- und seinen Südpol. Nähert man einem der Pole des durchströmten Solenoids den einen Pol eines Magnetstabes, so findet Anziehung oder Abstossung statt. Ein jeder Pol des Solenoids wird

Fig. 597.

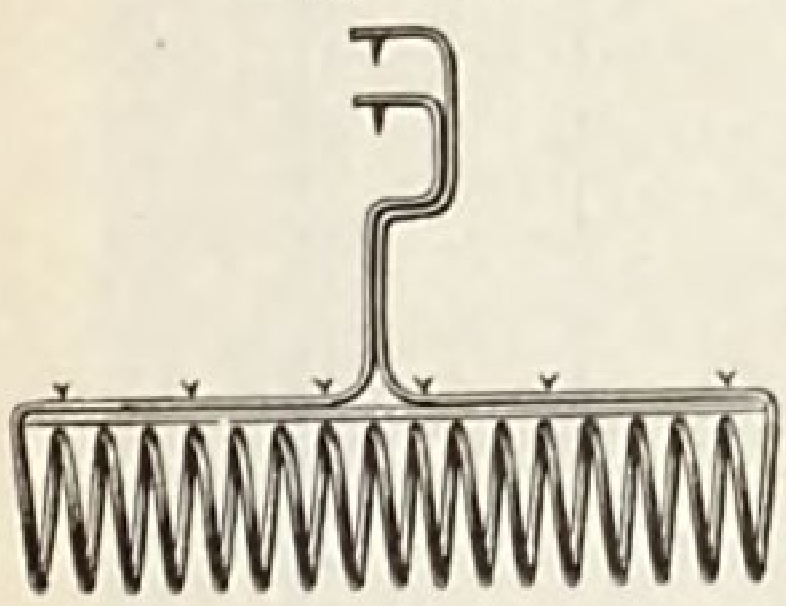
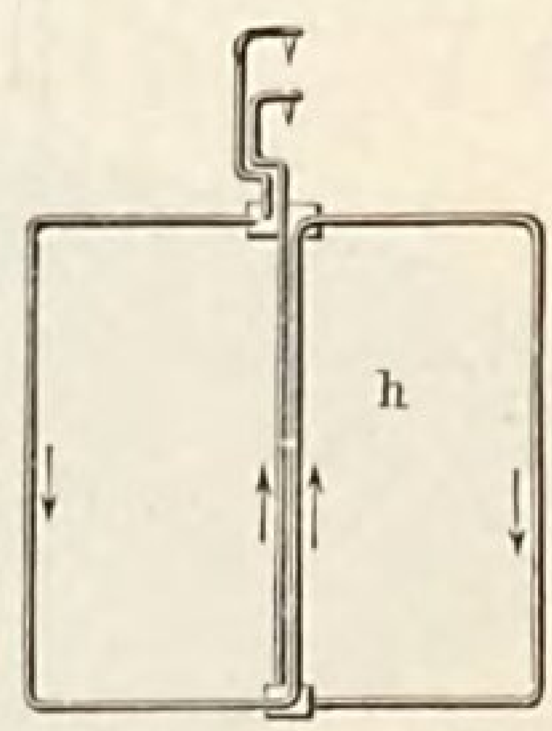


Fig. 598.



vom gleichnamigen Pole des Magnetstabes abgestossen, vom ungleichnamigen angezogen.

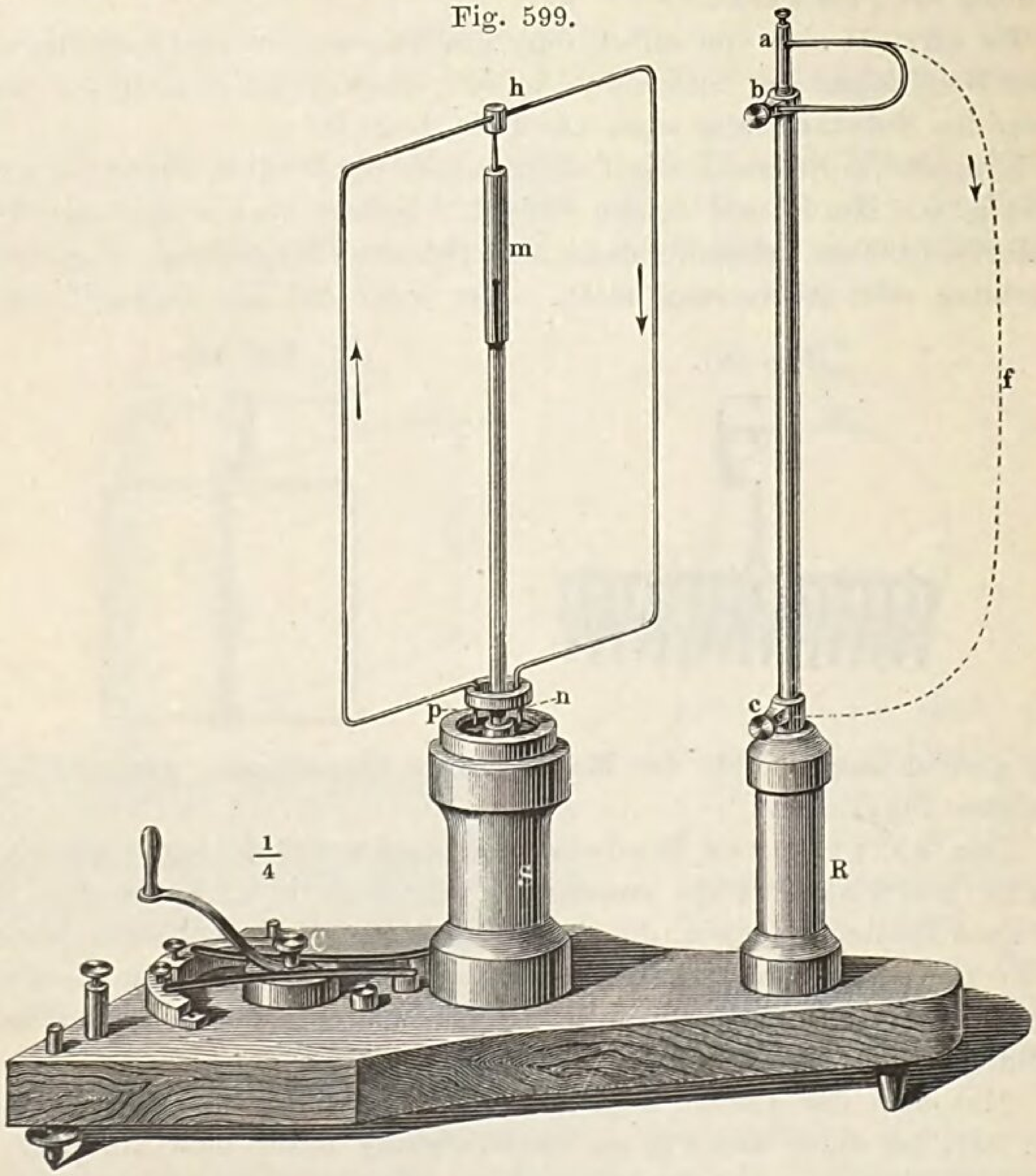
Den astatischen Nadeln entsprechend hat man auch astatische Leitungsdrähte construirt, welche, wie der Leiter Fig. 598, aus zwei Theilen bestehen, die der Erdmagnetismus in entgegengesetzter Weise zu richten strebt, so dass das ganze System nun kein Bestreben mehr zeigt, unter dem Einfluss des Erdmagnetismus eine bestimmte Stellung einzunehmen.

Hat sich der Leiter, Fig. 595 oder Fig. 596, oder das Solenoid, Fig. 597, bei einer bestimmten Stromrichtung unter dem Einflusse des Erdmagnetismus eingestellt, so wird eine Umkehrung der Stromesrichtung eine Umkehrung der Polarität der durchströmten Leiter zur Folge haben, er wird sich also um seine verticale Drehungsaxe um 180^0 drehen müssen, ehe er in seine neue durch den Erdmagnetismus bestimmte Gleichgewichtslage gelangt.

Das Ampère'sche Gestell, welches wir oben in seiner einfachsten Gestalt kennen lernten, ist in mannigfacher Weise abgeändert worden. Fig. 599 (a. f. S.) ist eine perspectivische Ansicht des Apparates, wie ihn Stöhrer in Dresden construirt, Fig. 600 (a. S. 717) ist der Grundriss desselben.

Der bewegliche Leiter ist mittelst eines Stahlhütchens *h* auf eine Stahlspitze aufgesetzt, um die er sich frei drehen kann. Unten endet der bewegliche Leiter in zwei zugespitzten Drahtstücken *n* und *p*, deren jedes in eine halbkreisförmige, mit Quecksilber gefüllte Rinne eintaucht. Diese beiden Rinnen sind, wie man Fig. 600 sieht, durch eine diametrale Scheidewand von Holz oder Elfenbein isolirt, und so hoch mit Quecksilber gefüllt, dass sich der Spiegel desselben zu beiden Seiten noch

Fig. 599.



etwas über die Ränder der Scheidewand erhebt. Die Stellung des beweglichen Leiters wird durch Auf- und Abschieben der die Stahlspitze tragenden Hülse *m* so justirt, dass seine beiden nach unten gekehrten Enden sich eben noch frei über die isolirende Scheidewand der Quecksilberrinnen hinwegbewegen können.

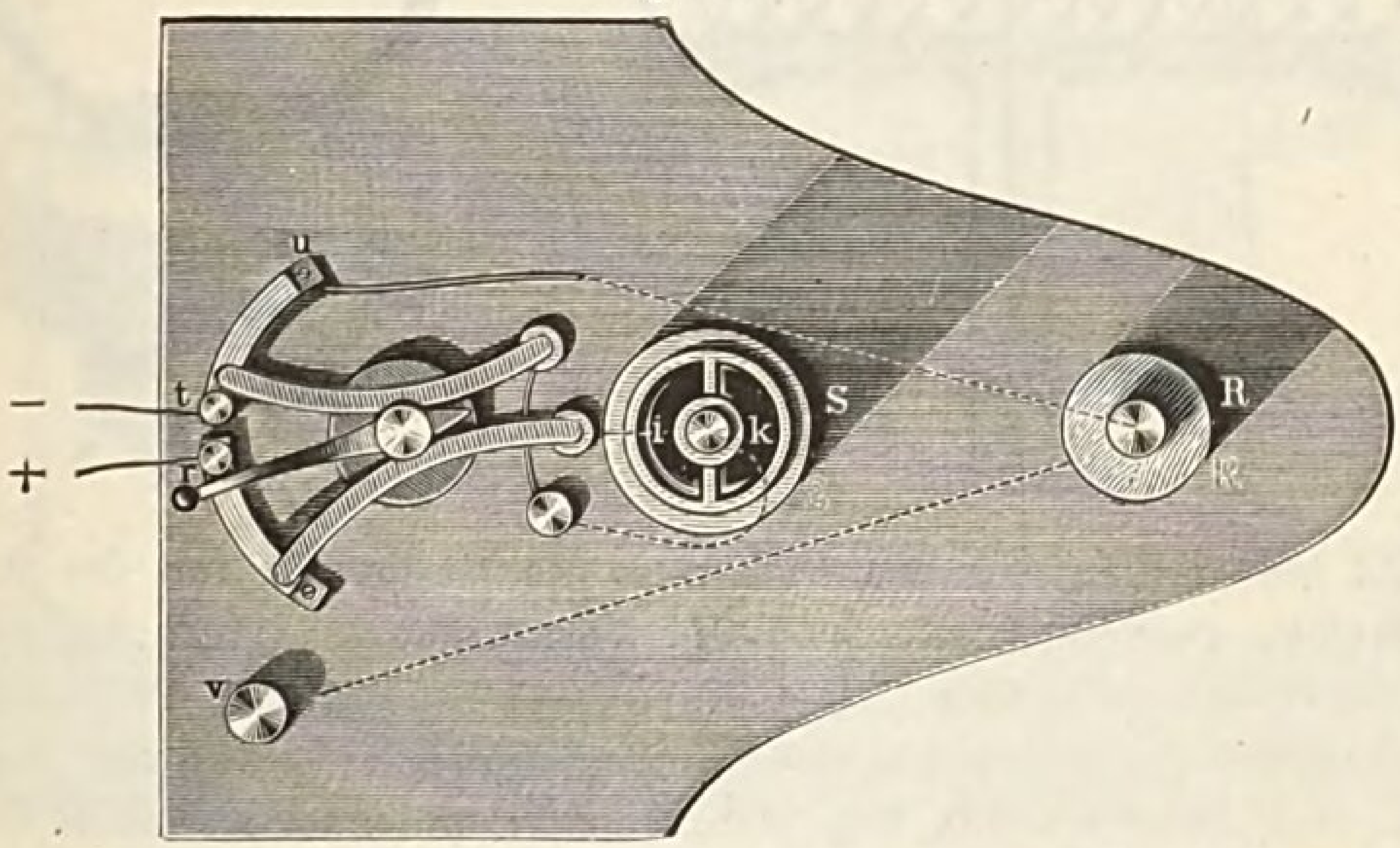
Die beiden Quecksilberrinnen sind durch Kupferdrähte, welche im Innern der Holzsäule *S* aufsteigen, mit dem Commutator *C* verbunden, welcher wohl ohne nähere Beschreibung durch den Grundriss, Fig. 600, verständlich sein wird. Ist nun bei *r* der positive, bei *t* der

negative Poldraht der Säule eingeschraubt, so tritt, wenn der Commutator steht, wie Fig. 600 zeigt, der positive Strom durch die Quecksilberrinne *i* in den beweglichen Leiter ein und durch die Rinne *k* aus, ohne in den später zu besprechenden Leiter *abc* zu gelangen.

Ist der ganze Apparat so aufgestellt, dass die Scheidewand zwischen *i* und *k* in dem magnetischen Meridian steht und *i* auf der Westseite liegt, so stellt sich der bewegliche Leiter rechtwinklig zum magnetischen Meridian ein, wenn der Commutator die in Fig. 599 und Fig. 600 gezeichnete Stellung hat.

Wird der Apparat bei der gleichen Stellung des Commutators so aufgestellt, dass die Scheidewand zwischen *i* und *k* rechtwinklig zum magnetischen Meridian steht, so wird der bewegliche Leiter unter dem Einfluss des Erdmagnetismus beständig um seine verticale Axe rotiren, denn so oft er, um seine verticale Axe sich drehend, in der Gleich-

Fig. 600.



gewichtslage ankommt, welche der bis dahin im Leiter stattfindenden Stromesrichtung entspricht, gehen die Drahtenden *p* und *n* über die isolirende Scheidewand hinweg; das Drahtende, welches bisher in *i* war, taucht nun in *k* ein und umgekehrt, es wird also in dem Moment, in welchem der Draht seine Gleichgewichtslage passirt, die Stromesrichtung in demselben umgekehrt und dadurch eine Fortsetzung der Drehung in gleicher Richtung bedingt.

Vertauscht man den beweglichen Leiter, Fig. 599, mit dem Solenoid, Fig. 601 (a. f. S.), so findet die Rotation desselben unter dem Einfluss des Erdmagnetismus statt, wenn die Scheidewand zwischen *i* und *k* rechtwinklig zum magnetischen Meridian steht.

Die Einwirkung von Magneten auf bewegliche Ströme lässt sich auch mit de la Rive's schwimmendem Strom zeigen. In einem Stücke Kork, Fig. 602 (a. f. S.), ist ein Stück Zink *Z* und ein Stück Kupfer *K* befestigt, und beide Platten sind durch mehrere kreisförmige Windungen von übersponnenem Kupferdraht verbunden. Auf gesäuertes

Wasser gesetzt, bildet sich ein Strom, der vom Zink im Wasser zum Kupfer und dann durch den Draht in der durch den Pfeil angedeuteten Richtung hindurchgeht. Die Kraft, mit welcher der Erdmagnetismus solche schwimmenden Ströme richtet, ist freilich äusserst gering, dagegen tritt die Anziehung und Abstossung derselben durch Magnete ganz entschieden auf.

Fig. 601.

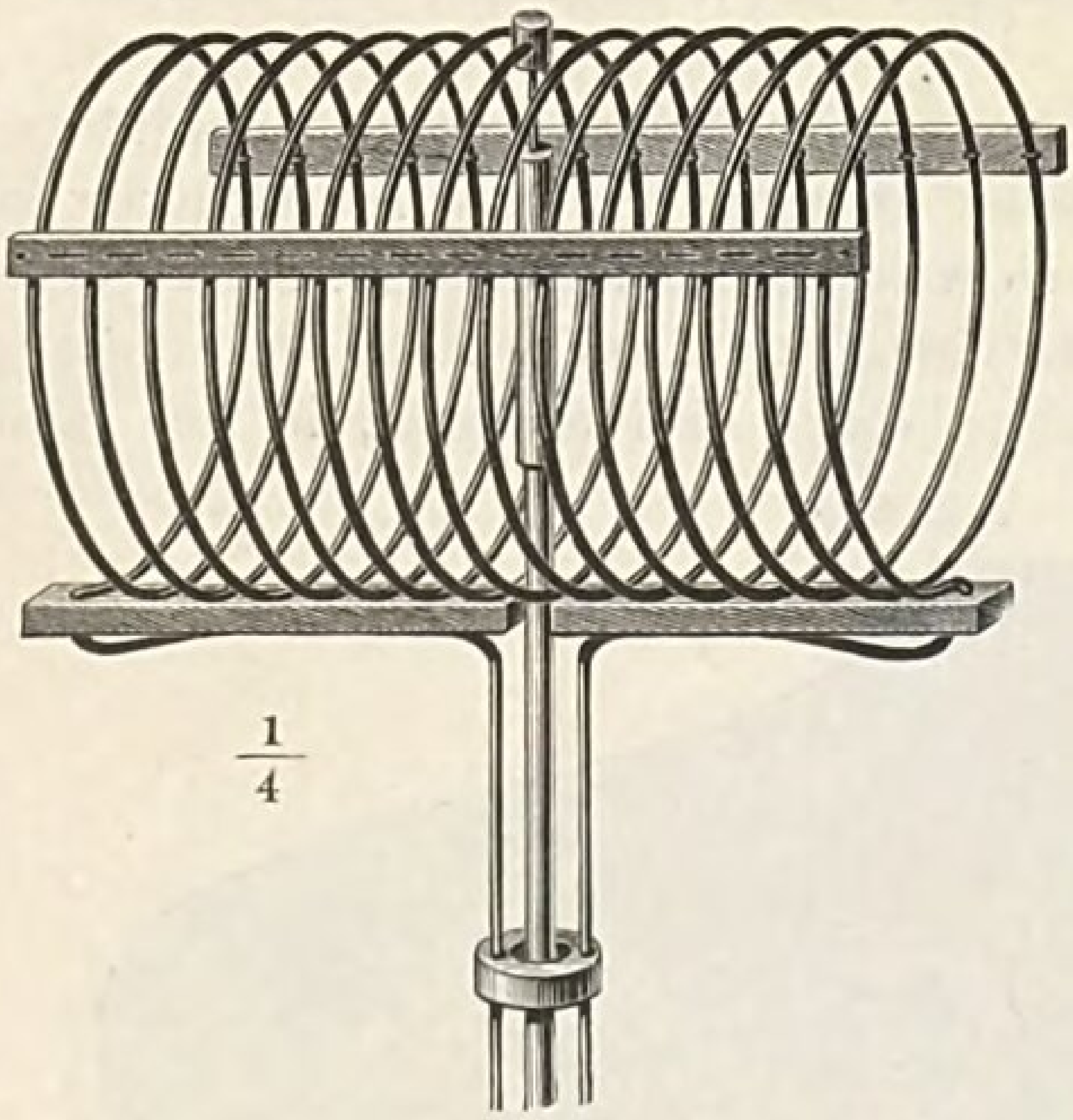
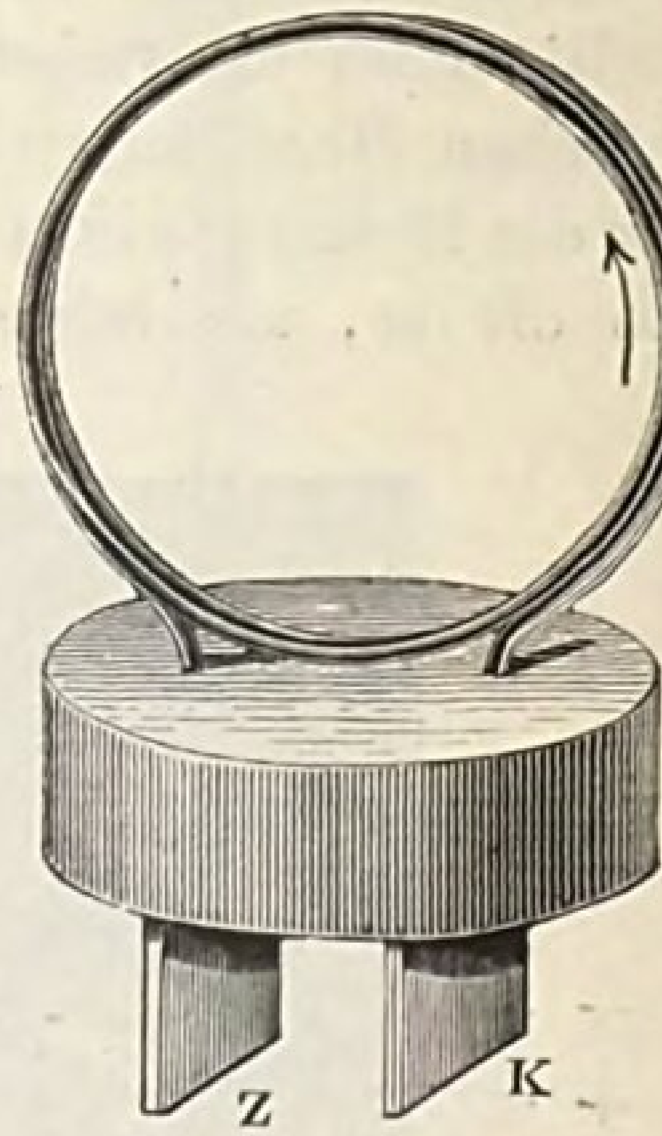


Fig. 602.



Wir betrachten jetzt den Fall, dass die Magnetaxe mit der Axe des Leiterkreises zusammenfalle und die Verschiebung längs der gemeinschaftlichen Axe stattfinde. Um die darauf bezüglichen Versuche nicht bloss qualitativ, sondern annähernd quantitativ auszuführen, bedienen wir uns eines Magnets *NS*, Fig. 603, welcher, um dem Leiter *RR'* freien Weg zu gestatten, mittelst eines längeren Holzstabes *HH'* horizontal aufgestellt ist. Die Kraftlinien des Magnets sind auf einem länglichen Rechtecke aus Pappe aufgezeichnet. Dieselben entsprechen der Fig. 72, S. 81, und sind demnach so construirt, dass durch ihre Rotation um die Magnetaxe das magnetische Feld in 10 Räume getheilt wird, durch deren jeden ein Zehntel sämmtlicher Kraftlinien hindurchgehen *). Der ringförmige Leiter *RR'* ist aus mehreren Windungen isolirten Drahtes zusammengewickelt, dessen Enden mit den Klemmen eines Galvanometers von mässiger Empfindlichkeit verbunden werden **). Bringen wir diesen Leiter von rechts nach links bis zur Kraftlinie 1, so entsteht nach der Faraday'schen Regel ein Strom, welcher vorn nach abwärts

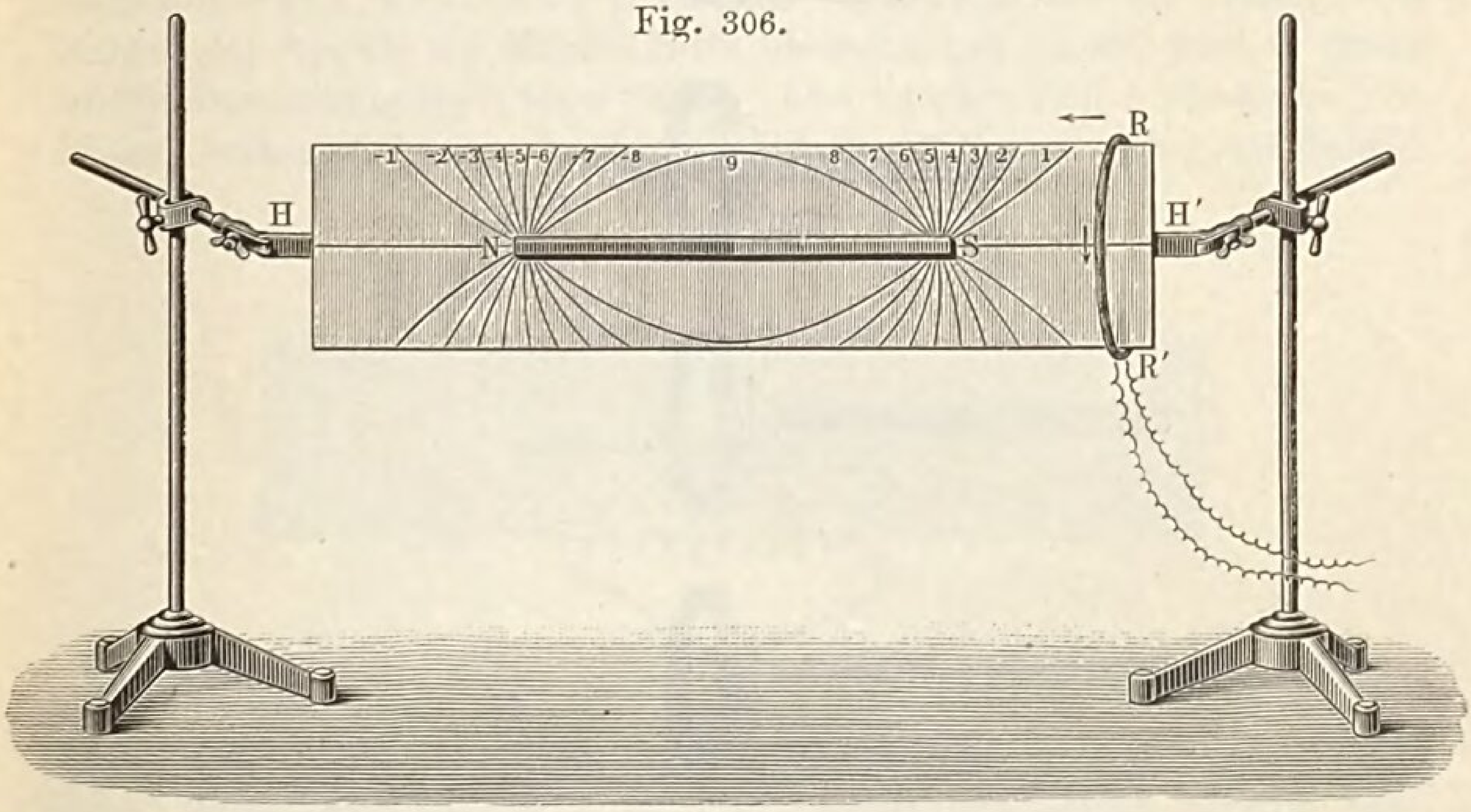
*) Dabei ist ein idealer Magnet vorausgesetzt, dessen Pole in zwei Punkten concentrirt sind. Da dies in Wirklichkeit nicht genau der Fall ist, so ist keine ganz vollkommene Uebereinstimmung der Versuche mit der Theorie in quantitativer Hinsicht zu erwarten.

**) Bei einem empfindlichen Galvanometer genügt auch ein einfacher Reif.

gerichtet ist. Verschieben wir dann successive den Leiter bis zu den Kraftlinien 2, 3, 4, 5 u. s. f. bis 9, wo die Mitte des Magnets liegt, so werden jedesmal gleiche Quantitäten von Elektricität in Bewegung gesetzt. Bei gleichbleibender Geschwindigkeit muss daher die Stromstärke von Anfang an zuerst zunehmen, bei 5 ein Maximum erreichen, und dann bei 9 bis zum Werthe Null abnehmen. Von dort an wechselt der Strom die Richtung, die Stromstärke steigt bis zur Kraftlinie — 5 und nimmt von dort wiederum ab. Bei der Umkehr erhält man die entgegengesetzten Stromrichtungen.

Würde man den Stromleiter festhalten und statt dessen den Magnet verschieben, so würde man dieselben Resultate erhalten. Die Fig. 604 (a. f. S.) giebt eine Uebersicht der mit den Bewegungen des Magnets

Fig. 306.



zusammenhängenden Stromrichtungen, wobei die Pole die umgekehrte Lage haben*).

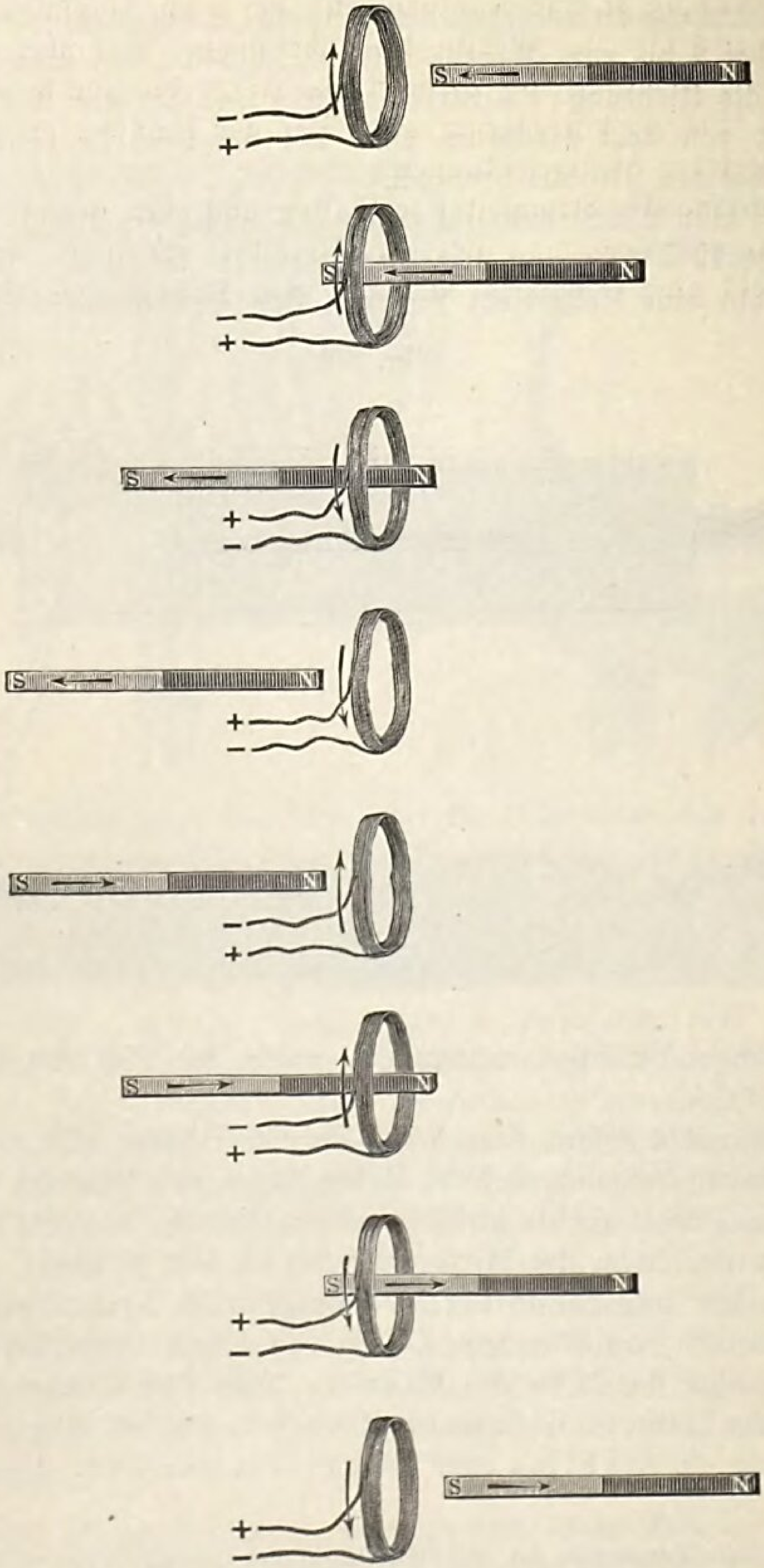
Man übersieht sofort, dass, wenn der Stromleiter sich gerade über der Magnetmitte befindet, sowohl Bewegungen des Magnets nach links als auch solche nach rechts gleichgerichtete Ströme hervorrufen, welche allerdings in der Nähe der Mitte nur schwach sein können.

Kehren wir nun das in Fig. 603 dargestellte Experiment um und denken uns einen kreisförmigen Leiter von einem zugeführten Strome durchflossen über der Mitte des Magnets. Nach dem Gesetze von Lenz muss dann der Leiter im Gleichgewichte stehen, welches aber je nach der Stromrichtung ein stabiles oder ein labiles sein wird. Angenommen,

*) Bei diesen Versuchen ist das Galvanometer hinreichend entfernt aufzustellen, damit die Verschiebung des Magnets für sich allein keine merkbare Wirkung äussern kann. Schon aus diesem Grunde ist die Anordnung mit feststehendem Magnete vorzuziehen.

der Leiter habe einen Strom von derselben Richtung, wie er bei Bewegungen von der Mitte nach links oder rechts inducirt würde, so

Fig. 604.

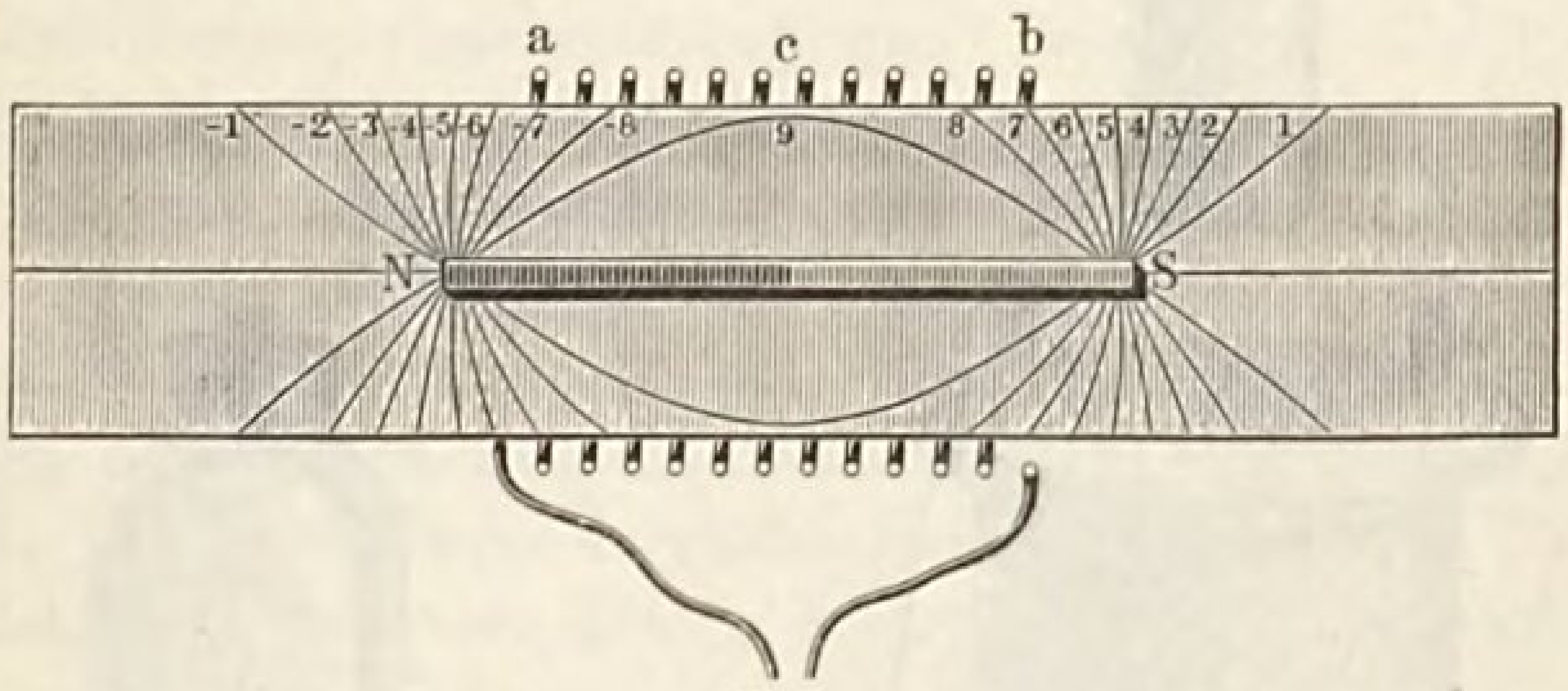


wirkt dieser Strom einer solchen Bewegung beiderseits entgegen, dann ist also ein stabiles Gleichgewicht vorhanden. Bei entgegengesetzter

Stromwirkung dagegen ist das Gleichgewicht labil. Man kann dies durch den Versuch zeigen, indem man entweder den Leiter an den Zuleitungsdrähten aufhängt, oder den Leiter festhält und den Magnet an den Enden aufhängt.

Jetzt gehen wir zu dem Falle eines schraubenförmig gewundenen Leiters über. In Fig. 605 ist wiederum ein horizontaler Magnetstab mit seinen Kraftlinien und im Durchschnitt eine Drahtspirale *ab* angedeutet, deren Enden *m* und *n* wir uns mit den Klemmen eines Galvanometers verbunden denken. Indem wir uns vorstellen, dass diese Spirale von der rechten Seite her über den Südpol des Magnets in ihre jetzige symmetrische Lage gebracht wurde, sehen wir ein, dass zunächst in allen ihren Windungen ein Strom inducirt wurde, der, wie in Fig. 603, die Richtung vorn nach abwärts hat. Sobald jedoch die ersten Windungen der Spirale die Magnetmitte überschritten haben, wird in ihnen ein zweiter entgegengesetzter Strom, also vorn nach aufwärts, inducirt, während in den noch über der Südhälfte des Magnets befind-

Fig. 605.

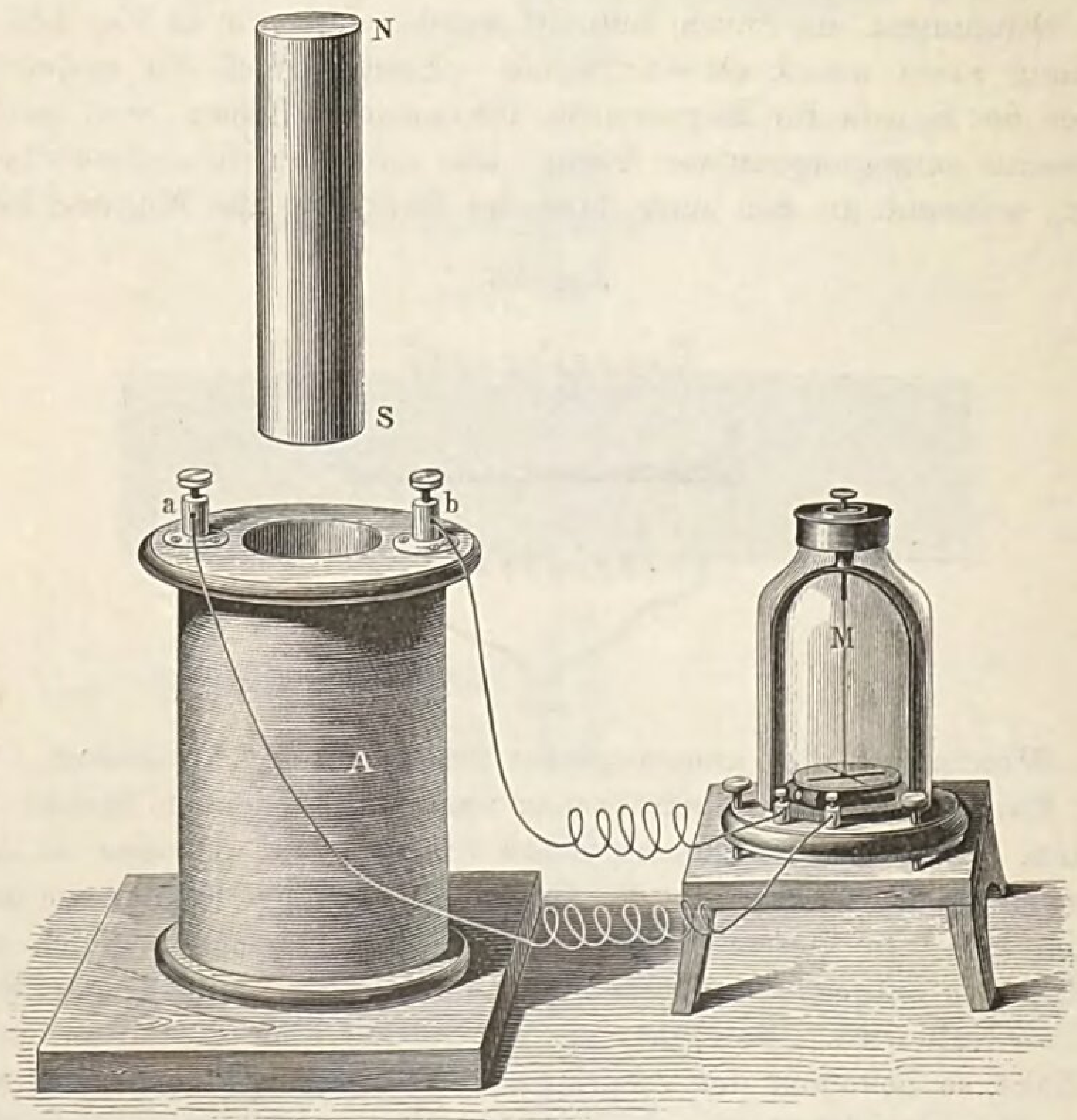


lichen Windungen die ursprüngliche Stromrichtung fortdauert. Der totale Strom wird der algebraischen Summe der beiden Ströme entsprechen. Der neue entgegengesetzte Strom bleibt offenbar so lange schwächer als der frühere, bis die Spirale die symmetrische Lage angenommen hat. In diesem Augenblicke werden momentan gleich viele Kraftlinien in entgegengesetztem Sinne geschnitten, so dass der totale Strom = Null wird. Bewegen wir die Spirale über die Mitte hinweg nach links, so bekommt der zweite Strom das Uebergewicht, weil mehr der negativ bezeichneten Kraftlinien zuwachsen, als von den positiven in Wegfall kommen, mithin entsteht im Ganzen ein Strom vorn nach aufwärts; gehen wir von der Mitte nach rechts zurück, so entsteht ein entgegengesetzter Strom zum ursprünglichen. Wir mögen also die Spirale von der Mitte aus nach rechts oder nach links bewegen, stets erhalten wir einen und denselben Strom, welcher vorn nach aufwärts gerichtet ist. Nach dem Gesetze von Lenz wirkt ein solcher Strom der Bewegung der Spirale von der Mitte nach den Enden entgegen, er muss also die Spirale über den Magnet (oder den Magnet in die Spirale) bis zur symmetrischen Lage hineinziehen und dort ein stabiles Gleichgewicht

herstellen. Dasselbe muss aber auch ein von vornherein nicht magnetisches Stück weichen Eisens thun, denn dasselbe wird nach Ampère's Regel durch einen vorn nach aufwärts gerichteten Strom in einen Magnet verwandelt, welcher links den Nordpol hat. Auf diese Weise gelangen wir also zu demselben Resultate, wie wir es bereits im §. 183 mitgetheilt haben, nur dass wir dasselbe nunmehr tiefer begründen können.

Wir sehen jetzt auch ein, dass die Maxima der Kraftwirkung bei jenen beiden Lagen der Spirale eintreten werden, wo innerhalb derselben

Fig. 606.



die grösste Anzahl von gleich gerichteten Kraftlinien zu liegen kommen. Es wird dies bei einer Spirale, welche nicht länger ist als der Magnet oder das Eisen, nahe dann der Fall sein, wenn ihre Mitte mit einem der Pole zusammentrifft. Das für den Schraubendraht hier Abgeleitete gilt offenbar auch für eine Drahtspule mit mehreren Windungslagen.

Die Fig. 606 zeigt die Anordnung des Vorlesungsversuches, welcher zur Demonstration des Vorgetragenen angestellt zu werden pflegt. Es ist aber zweckmässiger, die Spirale horizontal so anzuordnen, dass man den Magnet nicht bloss hinein-, sondern auch hindurchstecken kann.

Ersetzt man dann das Galvanometer durch eine Batterie, so kann man die Bewegungserscheinungen hervorrufen, und zwar kann man zeigen, dass ein permanenter Magnet je nach Lage der Pole in der symmetrischen Lage im stabilen oder labilen Gleichgewichte sich befindet, dass ein Eisenstab unter allen Umständen in die Spirale hineingezogen und darin stabil festgehalten wird.

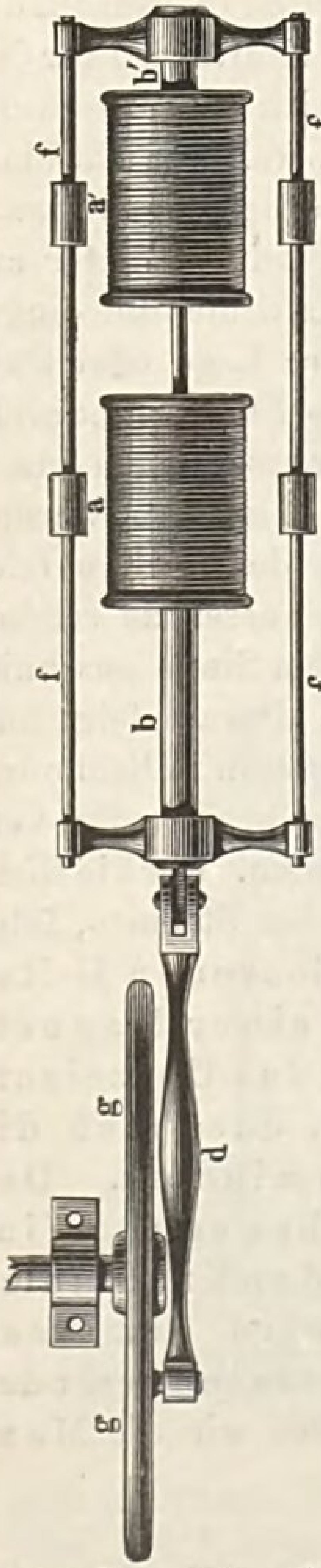
Man kann, wie Maxwell gezeigt hat, der allgemeinen Regel, dass die elektromotorische Kraft der Induction gemessen wird durch die Anzahl der vom Leiter in der Zeiteinheit gleichsinnig geschnittenen Kraftlinien für den Fall, dass der Leiter kreisförmig oder überhaupt in sich zurückkehrend geformt ist, eine specielle übersichtliche Fassung geben, welche nicht bloss bei Bewegungen längs der Magnetaxe, sondern für alle beliebigen Bewegungen derselben gültig bleibt. Denken wir uns nämlich den Leiter aus einer solchen Lage oder Stellung, wo noch keine Kraftlinie die eingeschlossene Fläche derselben durchbohrt, in eine andere Lage oder Stellung gebracht, wo Kraftlinien durch die umschlossene Fläche hindurchgehen, so schneiden diese Kraftlinien den Leiter von aussen nach innen und werden selbst von ihm gleichsinnig geschnitten. Dagegen werden diejenigen Kraftlinien, welche durch eine Bewegung des Leiters oder Magnets veranlasst werden, den Leiter von innen nach aussen zu schneiden, selbst von dem Leiter hierbei in entgegengesetztem Sinne geschnitten zu jenen, welche von aussen nach innen eintreten. Daraus folgt nun nothwendiger Weise, dass die Anzahl der für die Induction in Rechnung zu bringenden Kraftlinien zusammenfällt mit der Vermehrung oder Verminderung der die Leiterfläche durchdringenden Kraftlinien. Für die Richtung der elektromotorischen Kraft, beziehungsweise des Stromes, folgt daraus die Regel: Schaut man durch den geschlossenen Leiter in der Richtung, nach welcher der Nordpol einer Magnetnadel zeigt, so entsteht ein Strom im Sinne des Uhrzeigers (direct), wenn der Leiter so bewegt wird, dass sich die Anzahl der durchgehenden Kraftlinien vermindert. Der Strom ist entgegengesetzt der Uhrzeigerbewegung (invers), wenn sich die Anzahl der durchgehenden Kraftlinien vermehrt. Die elektromotorische Kraft wird gemessen durch die Anzahl der in der Zeiteinheit austretenden oder eintretenden Kraftlinien. Letzteren Satz wollen wir die Maxwell'sche Regel nennen.

Elektromagnetische Motoren von Page, Dub und Kravogl. 198 Auf der im vorausgegangenen Paragraphen abgeleiteten Eigenschaft der Stromspiralen, einen weichen Eisenstab in ihr Inneres hineinzuziehen, beruhen die nachstehend zu beschreibenden elektromagnetischen Motoren.

Fig. 607 (a. f. S.) stellt ein Modell des vom Amerikaner Page erfundenen Motors vor. Auf einem Brett sind in horizontaler Lage zwei

Magnetisirungsspiralen *a* und *a'* so befestigt, dass ihre Axen genau in dieselbe gerade Linie fallen. Die beiden Eisenstäbe *b* und *b'*, durch ein Messingstäbchen mit einander verbunden, sind an dem beweglichen Rahmen *ff* befestigt, welcher ihnen zur Führung dient. Geht ein Strom durch *a'*, so wird *b'* nach der Linken gezogen; sobald der Stab *b'* ganz in *a'* hineingeschoben ist, wird der Strom in *a'* unterbrochen, während er durch *a* zu laufen beginnt. *b* wird jetzt in die Spirale *a* hineingezogen, während *a'* nicht mehr auf *b'* wirkt; ist die Bewegung nach der rechten Seite hin vollendet, so tritt abermals ein Stromwechsel ein, und so wird eine hin- und hergehende Bewegung erzeugt, welche durch die Triebstange *d* dem Schwungrade *g* eine rotirende Bewegung mittheilt.

Fig. 607.



Die Vorrichtung zum Stromwechsel ist an der Schwungradwelle angebracht. Diese, sowie die Drahtleitungen sind in der Zeichnung weggelassen.

Als eine Abänderung des Page'schen Apparates kann man den in Fig. 608 dargestellten betrachten, welcher in seinem Aeusseren die Dampfmaschine gleichfalls nachahmt, wie der vorige. Die beiden Spiralen stehen vertical. Dadurch, dass abwechselnd der Eisenkern *C* und dann wieder der Eisenkern *D* in seine Spirale hineingezogen wird, wird der Balancier *GE* in Bewegung gesetzt, dessen auf- und niedergehende Bewegung durch Pleuelstange und Kurbel in eine rotirende Bewegung verwandelt wird. An der Umdrehungsaxe befindet sich ein Schwungrad und eine excentrische Scheibe, deren Gestänge mit einem Schieber endigt, durch dessen Hin- und Hergehen abwechselnd die Spirale *A* und dann wieder die Spirale *B* in den Schliessungsbogen der Batterie gebracht wird.

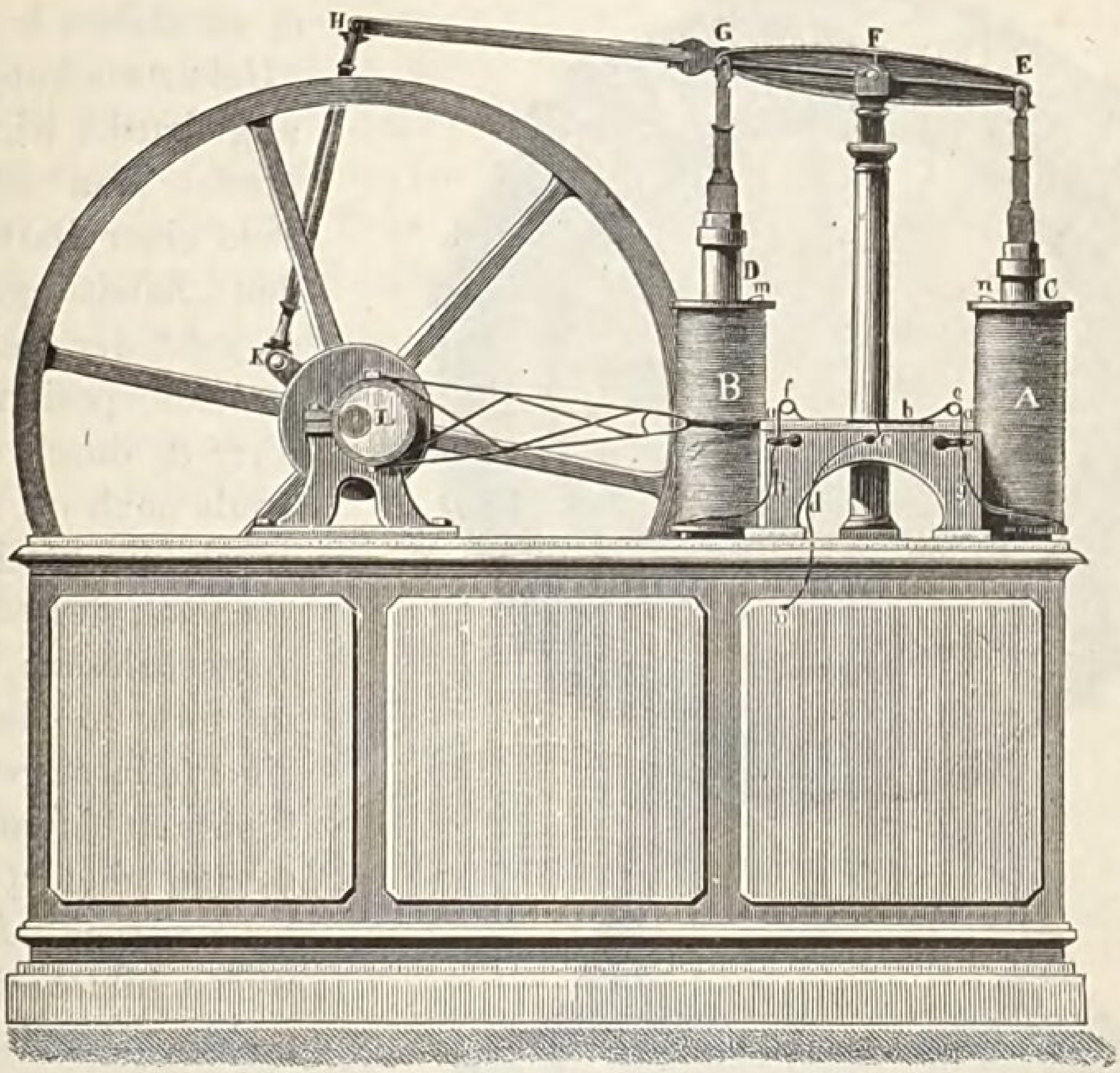
Dub hat eine ähnliche Construction ausgeführt, wobei statt der einfachen Wirkung einer Spirale auf einen Kern eine solche Anordnung benutzt wird, wie sie bei dem Elektromagnet von Romershausen (§. 183, Fig. 539) beschrieben wurde.

Mechaniker Kravogl in Wilten bei Innsbruck hat im Jahre 1867 einen elektromagnetischen Motor erfunden und ausgeführt, welcher nach den Messungen von A. v. Waltenhofen die besten bis dahin construirten Apparate dieser Art an Nutzeffect um das Achtfache übertraf und auch durch die Eigenthümlichkeit seiner Construction Interesse

erregt. Wir geben hier statt einer genauen Zeichnung eine ideal gehaltene Abbildung, aus welcher die Construction deutlicher zu ersehen ist (Fig. 609 a. f. S.).

Auf dem Gestelle *G* ist um eine horizontale Axe *O* eine Scheibe *A* aus isolirendem Materiale drehbar, welche an ihrem Umfange einen hohlen Messingring *R* trägt, der in der Figur in aufgerissenem Zustande dargestellt ist. Innerhalb dieses Messingringes ist ein bogenförmiges Stück weichen Eisens *NS* auf Frictionsrollen *rr* verschiebbar. Wir wollen vorläufig annehmen, dass dieses Eisenstück, wie in der Zeichnung, die halbe Länge des hohlen Ringes ausfülle. Der Messingring ist

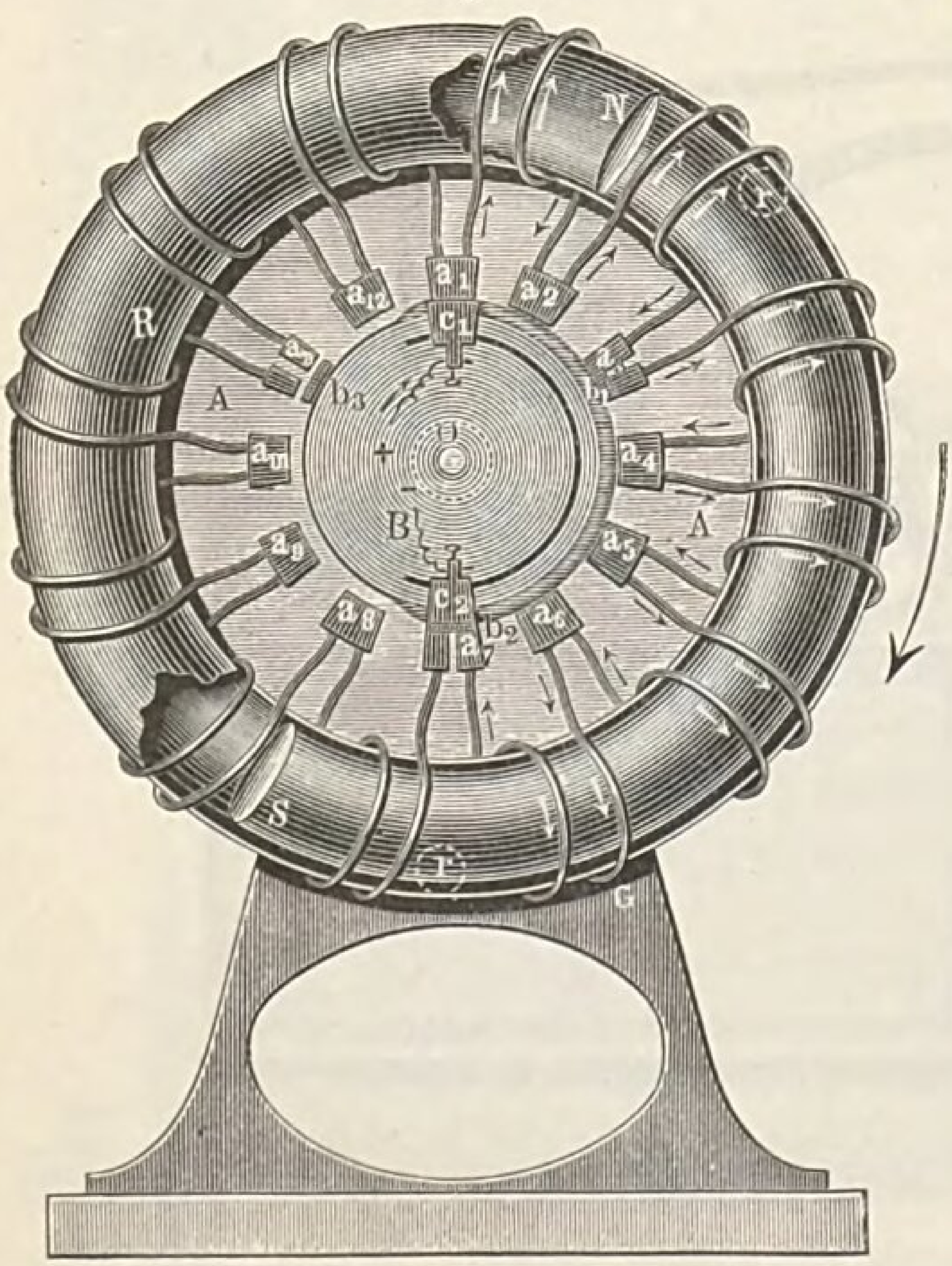
Fig. 608.



nun von einer Anzahl Spulen mit isolirtem Kupferdraht umgeben, dessen Windungen sämmtlich in demselben Sinne spiralförmig den Ring umkreisen. In der Zeichnung ist jede Drahtspule durch zwei Windungen repräsentirt. Die Drahtenden aller Spulen sind in der aus der Figur ersichtlichen Weise zu je zweien an isolirte Kupferprismen, a_1, a_2 ... a_{12}, angelöthet. Hierdurch würde aus allen Drahtwindungen eine einzige in sich geschlossene ringförmige Spirale entstehen, wenn nicht drei gleich weit abstehende Kupferprismen, a_3, a_7 und a_{11}, gespalten wären. Vor diesen drei gespaltenen Prismen befinden sich jedoch die durch Federkraft gegen die Ringmitte abgezogenen Kupferstücke b_1, b_2, b_3, welche wir Ueberbrückungsfedern nennen wollen. In der Figur befindet sich b_3 in der abgezogenen Lage, b_1

und b_2 sind eben an das gespaltene Prisma angedrückt und heben daselbst die Unterbrechung auf. Endlich ist auf derselben Axe O noch die Scheibe B aufgesteckt, jedoch so, dass sie in beliebiger Lage festgeklemmt werden kann und an der Rotation des Ringes nicht Theil nimmt. Auf derselben sind die beiden isolirten kupfernen **Zuleitungsstücke** c_1 und c_2 längs eines concentrischen Schlitzes beliebig verstellbar. Sie werden ausserdem durch Federkraft an die Kupferprismen angedrückt. Wir nehmen vorläufig an, dass die Zuleitungsstücke die in der Figur dargestellte Lage haben. Zwischen c_1 und c_2 ist auf der rechten Seite der Rand der Scheibe B wulstartig vorspringend, wodurch jede auf diese Seite an oder zwischen c_1 und c_2 zu stehen kommende Ueberbrückungsfeder angedrückt wird. Verbindet man daher die Pole einer Batterie mit den Zuleitungsstücken, so geht der bei c_1 eintretende positive Strom über a_1 durch die erste Spule nach a_2, von dort durch die zweite Spule nach a_3, dessen Brücke b_1 geschlossen ist, und so fort in der durch die Pfeile angedeuteten Richtung bis zum Prisma a_7 und über c_2 zur Batterie zurück. Auf diese Weise bildet die ganze rechtsseitige Hälfte des Ringes eine zusammenhängende Spirale. Das weiche Eisenstück SN nimmt im Anfange eine Ruhelage symmetrisch zum Verticalquerschnitt des Apparates ein, so dass also die rechtsseitige Hälfte des Eisens in die untere Hälfte der durchflossenen Spirale hineinragt. Hierdurch entsteht am rechtsseitigen Ende ein Nordpol und das Eisenstück wird in die Spirale hineingezogen respective gehoben. Da aber die Schwerkraft das Eisen nach abwärts zieht, so wird hierdurch auch die Spirale nach abwärts gezogen und der Ring zur Rotation im Sinne des Pfeiles gezwungen. Da die Zuleitungsstücke c_1 und c_2 an dieser Rotation nicht Theil nehmen, sondern stehen bleiben, so werden oben immer neue Spulen in den Strom eingeschaltet, unten dagegen ausgeschaltet. Durch Verdrehen der Scheibe B nach rechts können die vom

Fig. 609.



Strome durchflossenen Spulen in die wirksamste Stellung gegenüber der neuen Lage des gehobenen Eisenkernes gebracht werden. Durch Verstellen der Zuleitungsstücke c_1 und c_2 kann überdies die Anzahl der eingeschalteten Spulen modificirt werden. Eine nähere Ueberlegung ergiebt, dass es vortheilhaft ist, ihre Anzahl zu vermindern und den Eisenkern nur ungefähr ein Drittel des Umfanges lang zu wählen. Da stets mindestens eines der gespaltenen Prismen und zwar mit offener Brücke auf die linke Seite zwischen c_1 und c_2 zu liegen kommt, so bleibt der Strom auf dieser Seite stets unterbrochen. Hierdurch wird eine schädigende Nebenschliessung vermieden und, falls ein Theil des Eisenkernes in die linke Hälfte hinüberragen würde, eine schädliche Einwirkung auf diesen Theil verhindert. Kravogl hat den Eisenkern durch Ausgiessen mit Blei beschwert, um ihn in tieferer Lage zurückzuhalten und ausserdem noch den ganzen Ring sammt Spulen allseitig mit einem in der Figur nicht angedeuteten Eisenmantel umgeben, welcher an der Rotation Theil nimmt. Da dieser Eisenmantel durch Influenz von Seite der Pole des Eisenkernes ebenfalls magnetisch wird, und seine entgegengesetzten Pole trotz der Rotation in der Stellung neben den Polen des inneren Eisenstückes erhält, so dass also die Windungen zwischen den entgegengesetzten Polen eines magnetischen Kerns und einer magnetischen Röhre hindurchgehen, so wird die Anzahl der von den Drahtwindungen durchschnittenen Kraftlinien, also auch die bewegende Kraft gesteigert.

Wie ersichtlich, ist Kravogl's Motor zunächst als eine Fortbildung des Motors von Page anzusehen, dessen hin- und hergehende Bewegung hier in eine continuirlich kreisförmige verwandelt ist. Gegenwärtig haben alle diese Motoren nur mehr historisches Interesse, da sie an Leistungsfähigkeit weit überholt werden durch die als Motoren angewandten dynamoelektrischen Maschinen von Pacinotti-Gramme und von von Hefner-Alteneck, worüber weiter unten berichtet werden soll.

Magnetoinduction durch Verschiebung kreisförmiger Leiter senkrecht auf die Magnetaxe. 199 Im §. 197 haben wir gezeigt, dass durch die Verschiebung eines in sich geschlossenen Leiters A, Fig. 610 (a. f. S.), längs der Magnetaxe nach B eine elektromotorische Kraft auftrete, welche dem Zuwachse der die Leiterfläche durchsetzenden Kraftlinien ihre Entstehung verdankt. Ein solcher Zuwachs kann aber auch durch andere Verschiebungen, z. B. aus den Stellungen C, C' nach B bewirkt werden, weshalb auch auf diese Weise ein Strom in der Richtung des Pfeiles zu erhalten ist. In allen diesen Fällen kann der Zuwachs der die Leiterfläche durchsetzenden Kraftlinien noch ganz besonders stark dadurch gefördert werden, dass man durch Annäherung von weichem Eisen die Kraftlinien gegen dasselbe anzieht und concentrirt. Die Fig. 611 (a. f. S.) deutet diesen Sachverhalt an. Die Kraftlinien des

Magnetpols *S* nehmen ihren Lauf durch das Eisenstück *ns* und machen dieses dadurch zu einem Magneten mit den Polen *n* und *s*. Wir können nun den Inductionsstrom hervorbringen, indem wir zuerst das Eisen *ns* dem Magnet gegenüber feststellen und dann den Leiter zwischen beide bringen, oder indem wir zuvor den Leiter um das Eisen legen und ihn mit demselben dem Magnetpol *S* von vorn oder von seitwärts nähern.

Noch wirksamer wird natürlich eine hufeisenförmige Anordnung sein, bei welcher die Kraftlinien im grössten Theil ihres Verlaufes innerhalb des Eisens zu liegen kommen. Fig. 612 stelle diese Anordnung vor. *ab* ist ein Hufeisenmagnet, dessen Polen die Enden *m* und *n* des weichen Hufeisens *c* gegenübergestellt werden. Das letztere ist von den Inductionsspulen umgeben. Jede Annäherung giebt dann einen Strom, jede Entfernung einen entgegengesetzten. Die Ströme beider Spulen können in einer Leitung gesammelt werden. Verbindet man das eine Ende der Windungen leitend mit dem Anker, das andere mit dem Stahlmagnet, so erhält man beim Abreissen an der Unterbrechungsstelle einen Inductionsfunken (Faraday's Funkenmagnet).

Fig. 610.

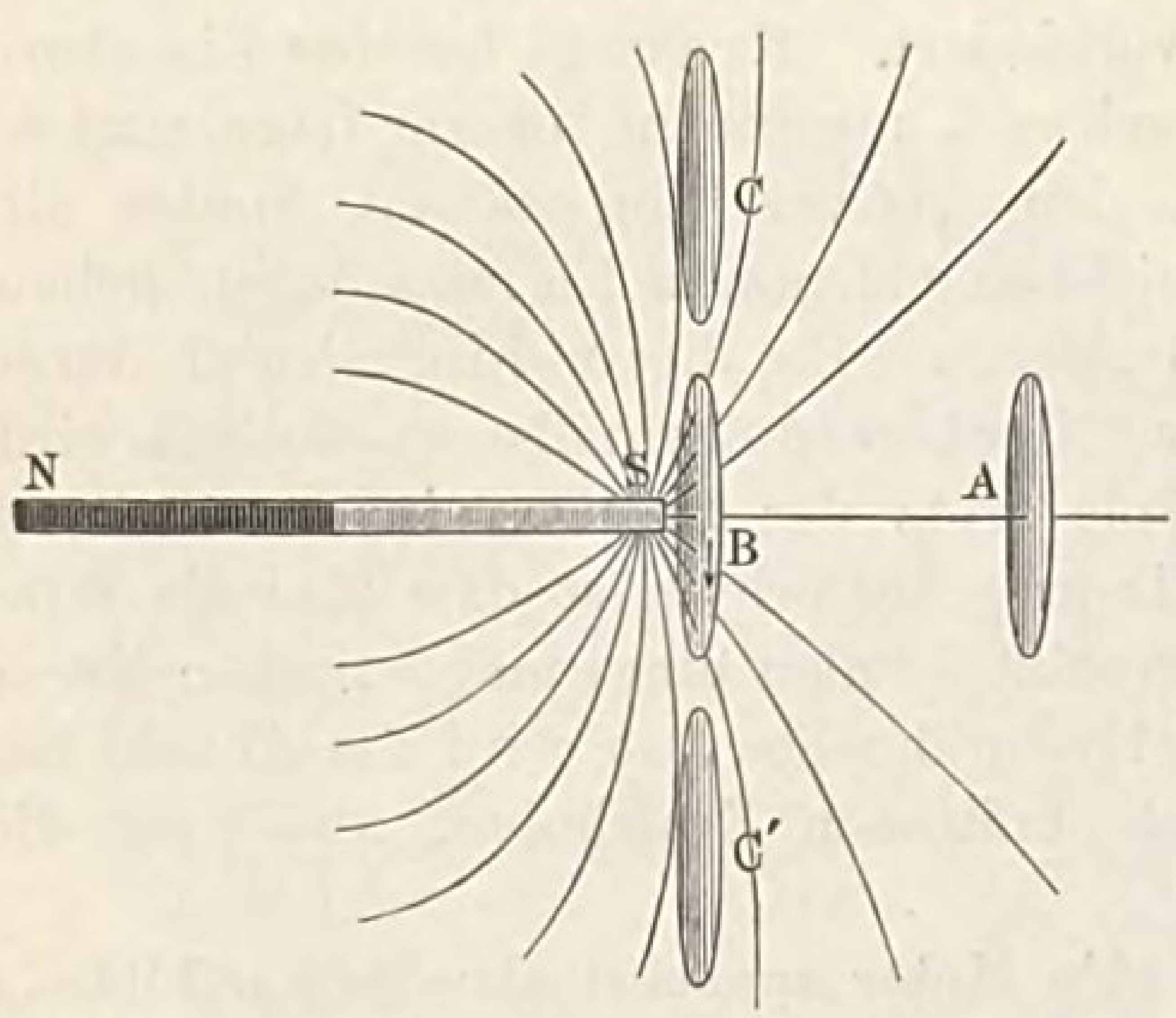


Fig. 611.

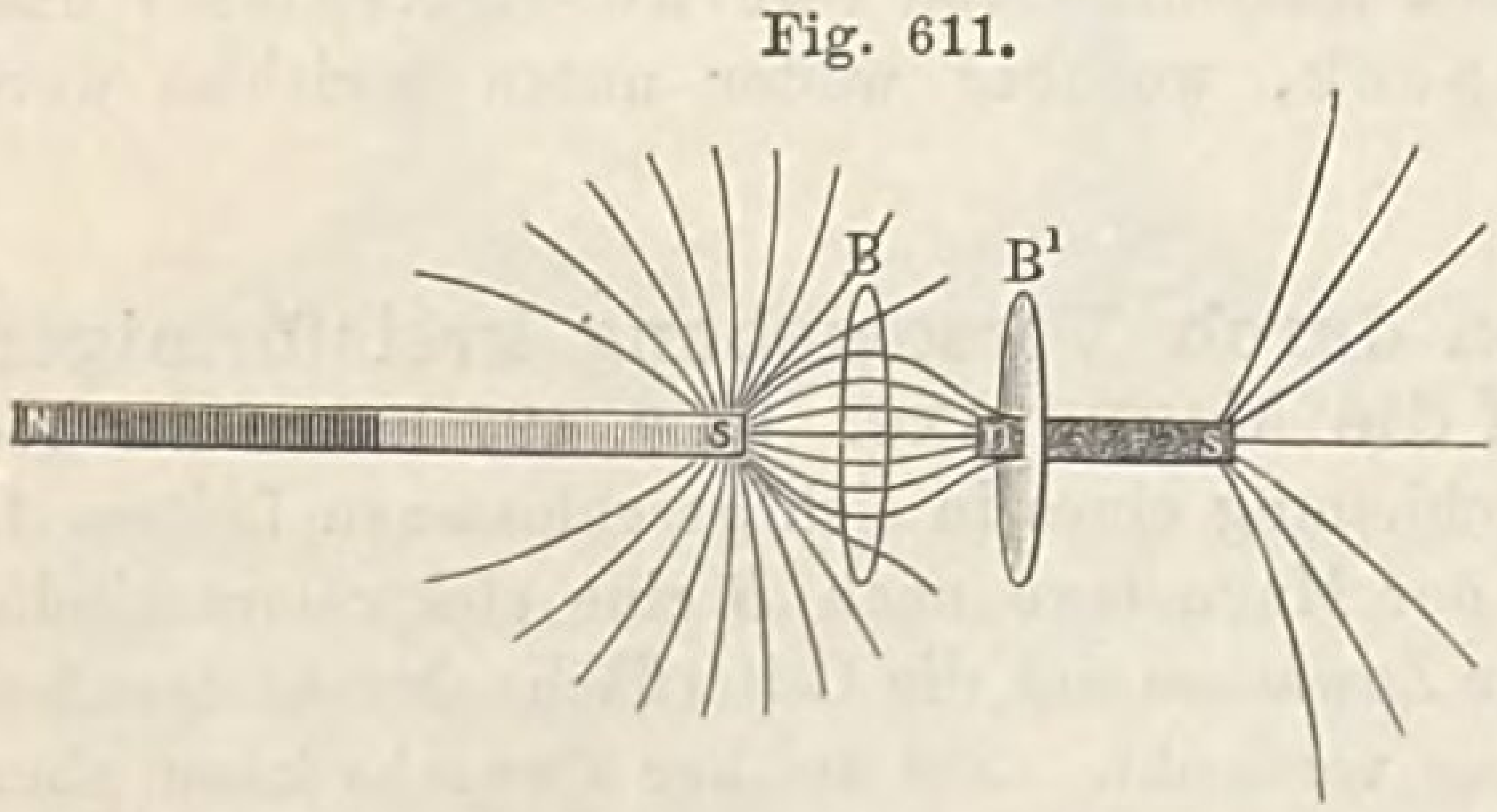
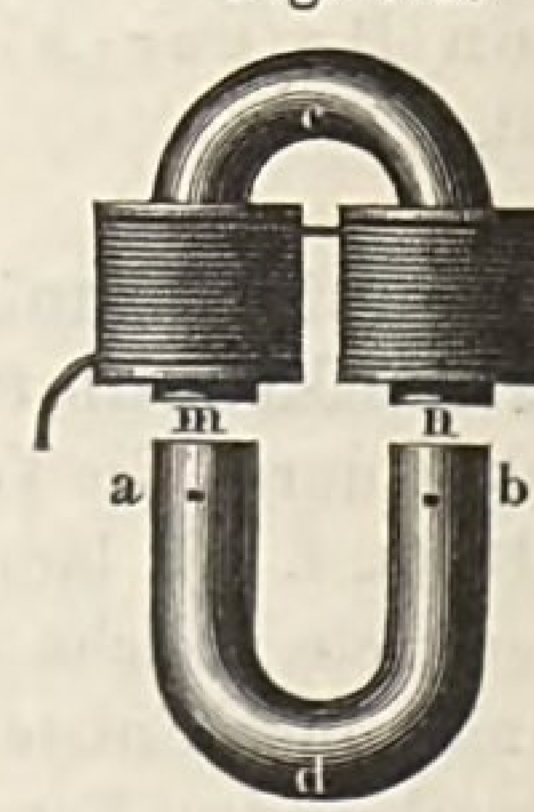


Fig. 612.

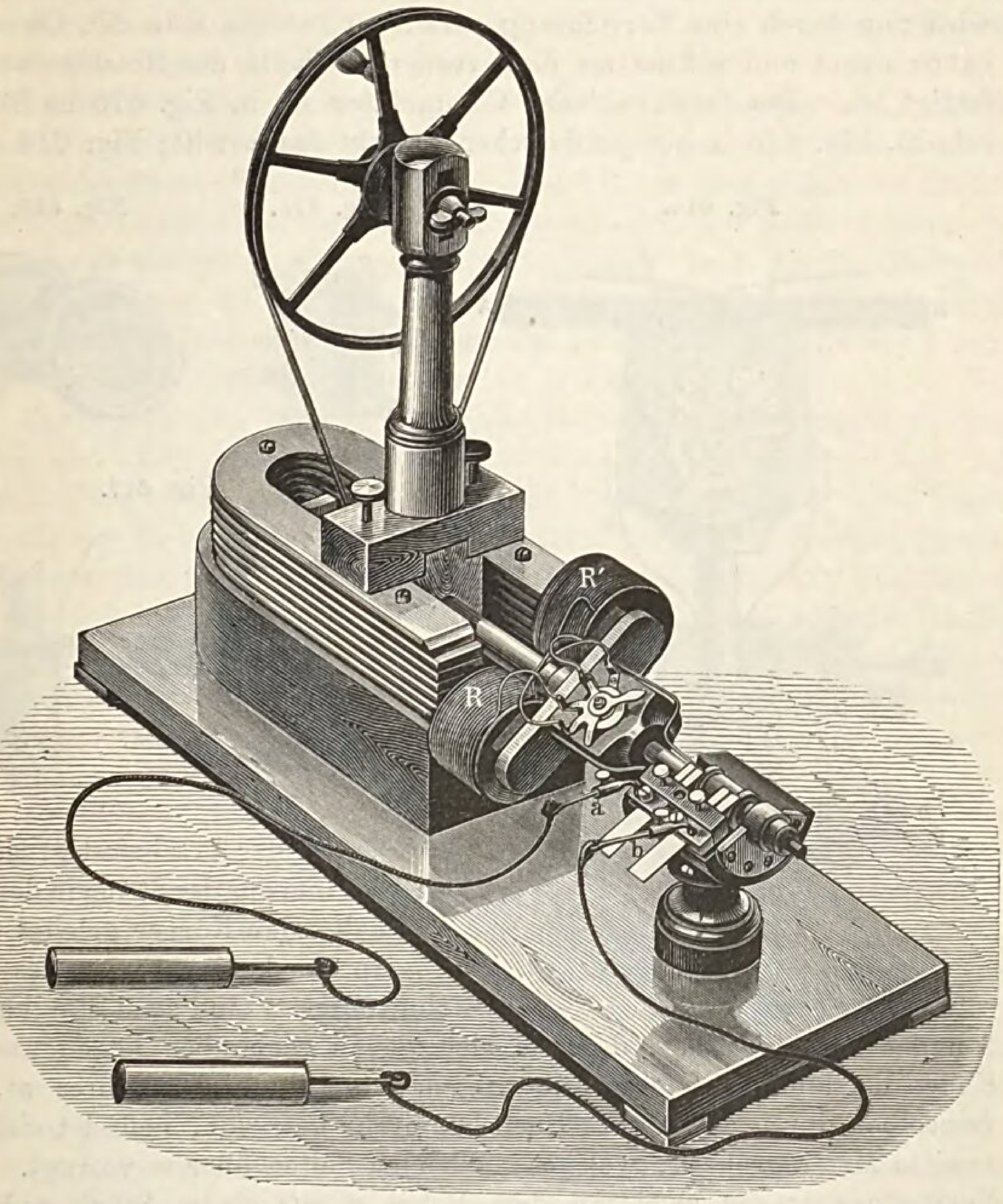


Nun wollen wir ein paar Apparate kennen lernen, welche nach den abgeleiteten Principien construirt sind und welche man „Magnetoinductoren", „magnetoelektrische Inductionsapparate" nennt.

Die erste Maschine der Art construirte Pixii im Jahre 1832; bei dieser rotirte der Magnet und nicht das weiche Eisen mit den Inductionsspiralen. Später erfuhr dieser Apparat bedeutende Veränderungen und

Verbesserungen, namentlich durch Saxton, Clarke, Ettingshausen, Petrina und Stöhrer. Bei allen den später construirten Maschinen sind die Magnete fest und die Inductionsspiralen beweglich. Fig. 613 stellt eine Stöhrer'sche Magneto-Inductionsmaschine von mittlerer Grösse dar.

Fig. 613.



Der aus mehreren Lamellen zusammengesetzte Hufeisenmagnet liegt wagerecht. In der Mitte zwischen den beiden Schenkeln desselben ist die Rotationsaxe angebracht, um welche sich die Inductionsspiralen drehen. Die Umdrehung dieser Axe wird durch einen Schnurlauf bewirkt, welcher von einer grösseren oberhalb befindlichen Drehscheibe über eine kleinere auf der Axe sitzende Rolle geht.

Die beiden Enden dieser eisernen Umdrehungsaxe laufen in Spitzen. Auf der vorderen Hälfte derselben ist eine eiserne Platte befestigt, welche

gegen die Magnetpole gekehrt, zwei Cylinder von weichem Eisen trägt, auf denen die Inductionsspiralen R und R' aufgesteckt sind.

Es kommt nun darauf an, während der Rotation der Spiralen zwischen den freien Drahtenden derselben stets denjenigen Körper einzuschalten, durch welchen man die Inductionsströme hindurchsenden will und überdies den Inductionsströmen gleiche Richtung zu geben; dies wird nun durch eine Vorrichtung vermittelt, welche man den Commutator nennt und welche an dem vorderen Theile der Rotationsaxe befestigt ist. Der Stöhrer'sche Commutator ist in Fig. 615 im Durchschnitt, Fig. 616 in perspectivischer Ansicht dargestellt; Fig. 614 zeigt,

Fig. 614.

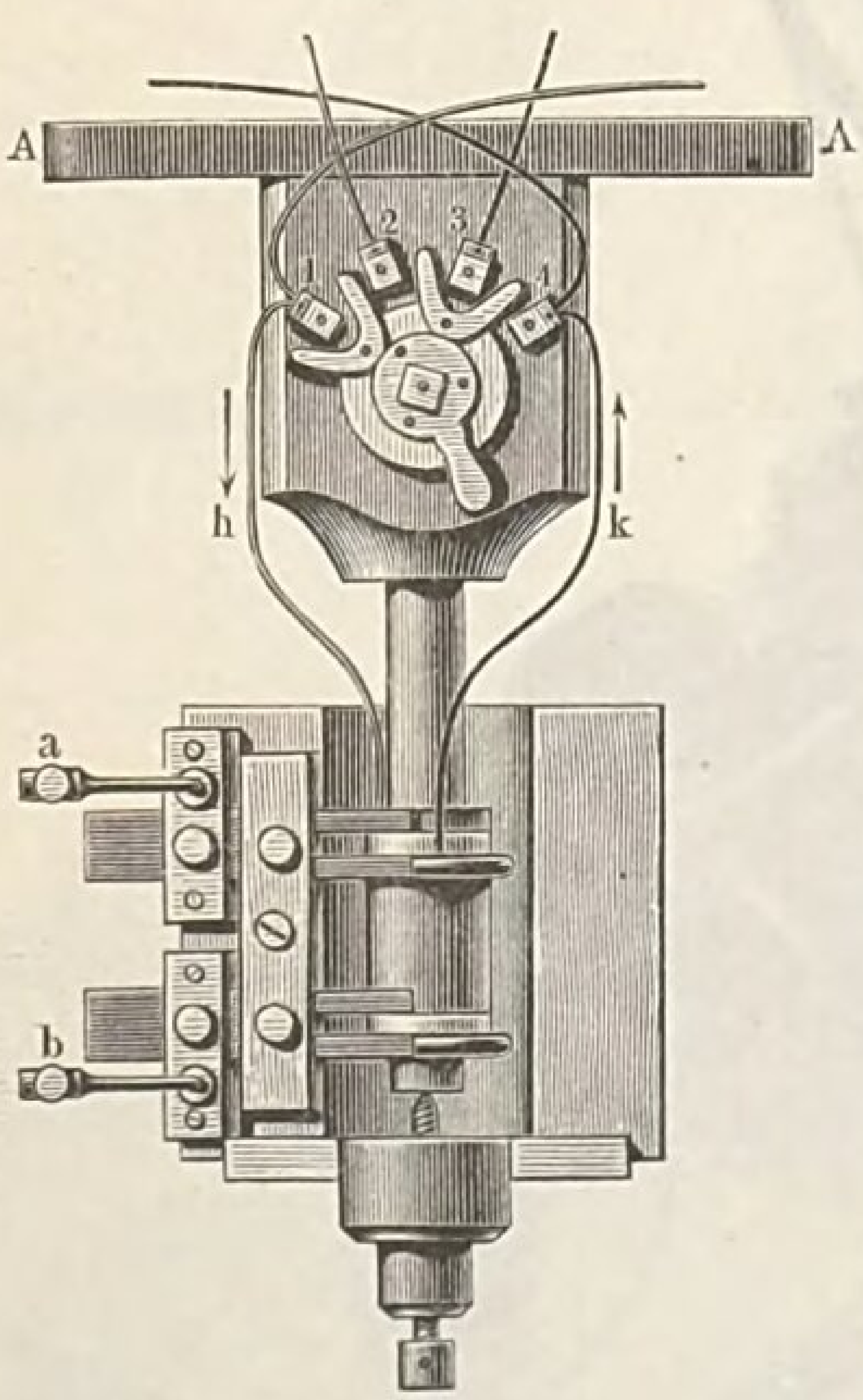


Fig. 615.

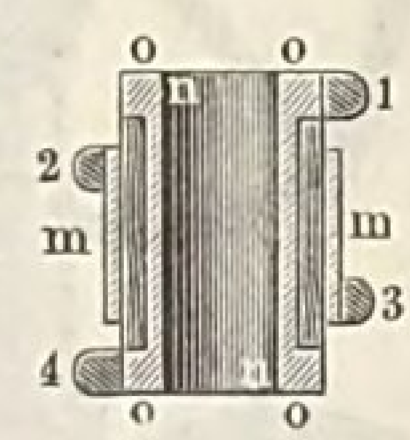


Fig. 616.

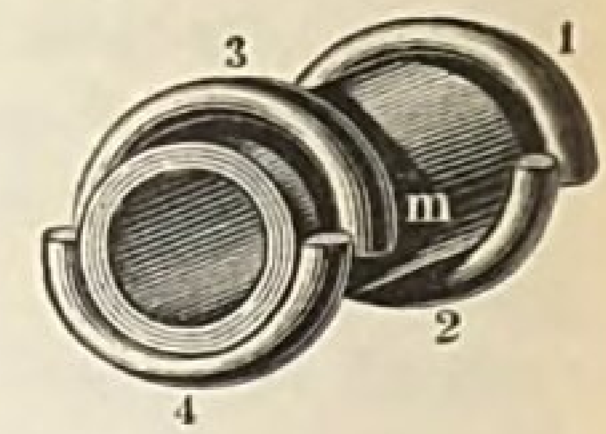
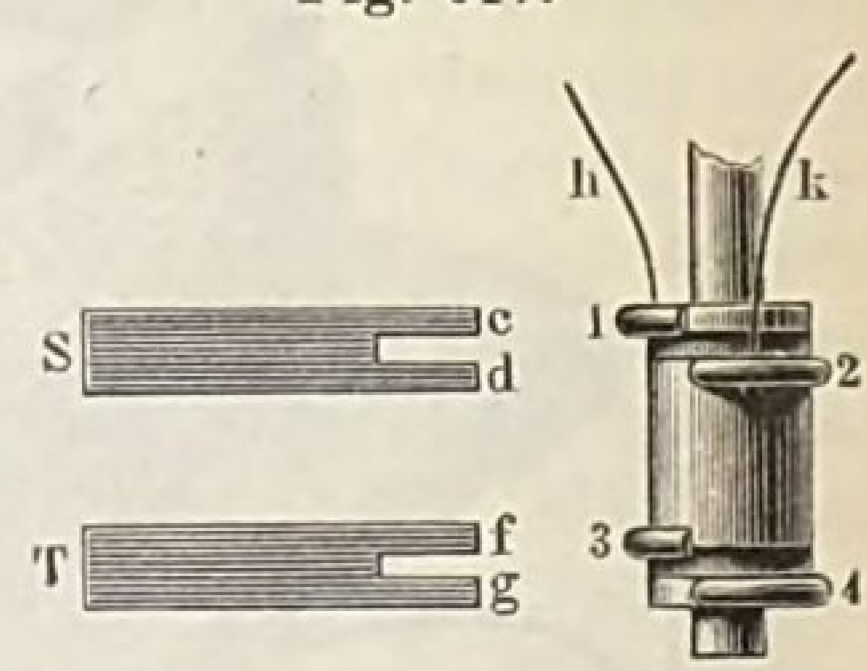


Fig. 617.



wie er auf der Axe befestigt ist und wie von ihm aus der Strom in den einzuschaltenden Körper geleitet wird.

An den beiden Enden des Messingrohres m sind zwei Stahlkämme 2 und 3 so aufgelöthet, dass sie sich genau gegenüber liegen und die Enden derselben sich etwas überragen. Innerhalb des Rohres m, von demselben durch ein dünnes Buchsbaumrohr getrennt, befindet sich ein zweites Messingrohr n, welches an beiden Seiten über m vorragt. Die Vorsprünge tragen zwei mit dem Rohre n aus einem Stück gedrehte Ringe o von gleichem Durchmesser mit der Höhlung des Rohres m; auf diese Ringe sind die Stahlkämme 1 und 4 den Stahlkämmen 3 und 2 correspondirend aufgelöthet, wie man dies am deutlichsten in Fig. 616 sieht.

Dieses ganze System ist auf der Umdrehungsaxe befestigt.

Das eine Drahtende k, Fig. 617, der Spiralen führt zum Kamm 2, das andere Drahtende h führt zum Kamm 1.

Zwei flache dünne Stahlfedern sind an dem Gestelle der Maschine so angebracht, dass ihre vorderen geschlitzten Enden von oben auf die

Stahlkämme drücken; sie können nach Belieben mittelst einer Schraube mehr oder weniger gespannt werden.

Der leichteren Uebersicht wegen sind in Fig. 617 die beiden Federn etwas von der Walze abgerückt gezeichnet. Die Feder *S* theilt sich in die Gabeln *c* und *d*; die Feder *T* theilt sich in die Gabeln *f* und *g*.

Mit der Feder *S* ist die Klemmschraube *a*, Fig. 614, mit *T* ist *b* in leitender Verbindung. Die Klemmschrauben *a* und *b* seien nun auf irgend eine Weise in leitende Verbindung gebracht.

In der Stellung, welche Fig. 614 und Fig. 617 entspricht, schleift *d* auf 2, *g* auf 4, während *c* und *f* frei sind. Wenn nun aber 1 von *h* die positive Elektricität aufnimmt, während 2 mit dem negativen Drahtende *k* in leitender Verbindung steht, so circulirt der positive Strom in folgender Weise durch den Apparat: von *h* geht er durch den Kamm 1 nach 4 und über die Gabel *g* zur Klemmschraube *b*, von dieser durch den eingeschalteten Leiter nach *a*, um über *d* und den Kamm 2 zum negativen Drahtende *k* der Spiralen zu gelangen.

Dreht sich nun die Axe für einen vorn stehenden Beschauer wie der Zeiger einer Uhr, so wird alsbald der Kamm 2 die Gabel *d* und der Kamm 4 die Gabel *g* verlassen, während *c* auf 1 und *f* auf 3 zu liegen kommt; der Commutator ist nun so gestellt, dass dieser Wechsel gleichzeitig mit dem Wechsel der Stromrichtung in den Spiralen stattfindet, so dass also in diesem Moment *k* das positive und *h* das negative Drahtende der Spiralen wird; es geht also der positive Strom jetzt von *k* auf 2 und 3, von da durch *f* nach *b* etc.; es wird also auch jetzt der positive Strom den zwischen den Klemmschrauben eingeschalteten Körper noch in der Richtung von *b* nach *a* durchlaufen.

Durch den Stöhrer'schen Commutator wird also bewirkt, dass der Inductionsstrom durch den zwischen *a* und *b* eingeschalteten Körper stets in gleicher Richtung hindurchgeht, obgleich die Stromrichtung in den Spiralen mit jeder halben Umdrehung sich ändert.

Schraubt man in die Klemmschrauben *a* und *b* die Drahtenden eines Elektromagnets ein, so wird dieser durch die Inductionsströme erregt; die Nadel einer zwischen *a* und *b* eingeschalteten Tangentenbussole zeigt, da die Ströme stets in gleicher Richtung dieselbe durchlaufen, bei einigermaassen schneller Drehung eine constante Ablenkung. In einem zwischen *a* und *b* eingeschalteten Voltameter findet Zersetzung statt und zwar wird das Sauerstoffgas stets an der einen, das Wasserstoffgas stets an der anderen Elektrode ausgeschieden. Der Strom einer magneto-elektrischen Rotationsmaschine kann, wenn derselbe kräftig genug ist, einen Metalldraht glühend machen etc.

Will man mit dem Rotationsapparate physiologische Schläge hervorbringen, so muss für eine momentane Unterbrechung des Stromes gesorgt sein. Dies geschieht beim Stöhrer'schen Commutator dadurch, dass die Kämme ein wenig über einander greifen, wie dies in Fig. 616 etwas übertrieben gezeichnet ist. Dadurch wird bewirkt, dass bei jeder

halben Umdrehung einmal auf ganz kurze Zeit alle vier Kämme des Commutators an den Federn schleifen, so dass die Spiralen direct durch die Federn geschlossen sind und kein Strom durch den Schliessungsbogen geht, welcher zwischen den Klemmschrauben *a* und *b*, Fig. 614, eingeschaltet ist. Dieser also im Apparate selbst zurückkehrende Strom ist ziemlich stark, weil er ausser dem Leitungswiderstande in den Spiralen keinen Leitungswiderstand im Schliessungsbogen zu überwinden hat, und in dem Augenblicke, wo nun zwei Kämme ihre Federn verlassen, wo also dieser directe Strom unterbrochen wird, entsteht in Folge dieser Stromunterbrechung in den Spiralen ein später zu besprechender Extrastrom, welcher in dem zwischen *a* und *b* mittelst Handgriffen eingeschalteten menschlichen Körper einen heftigen Schlag hervorbringt. Diesen Schlag erhält also der Körper zweimal bei jeder Umdrehung der Rotationsaxe.

Die Unterbrechung des im Apparate selbst zurückkehrenden Stromes giebt sich auch durch einen kräftigen, an der Unterbrechungsstelle auftretenden Funken zu erkennen.

Der Commutator ist so gestellt, dass zwei Kämme immer in demselben Momente die Feder verlassen, in welchem die Eisenkerne gleichsam von den Polen des Elektromagnets abreissen.

Die Einrichtung der Spiralen ist verschieden, je nachdem man verschiedene Wirkungen damit hervorbringen will. Ist im Schliessungsbogen ein grosser Leitungswiderstand zu überwinden, so müssen die Spiralen aus vielen Windungen eines dünnen Drahtes gebildet sein, um grosse elektromotorische Kraft zu liefern; dies ist z. B. der Fall bei Inductoren, welche dienen sollen, um starke physiologische Effecte zu geben. Mit solchen dünndrähtigen Inductoren bringt man aber einen dünnen Metalldraht, welcher in den Schliessungsbogen eingeschaltet ist, nicht ins Glühen; dazu ist ein Strom von grösserer Stärke nöthig, wie er erhalten wird, wenn die Spirale aus wenigen Windungen eines dickeren Drahtes gebildet ist.

Je nachdem ein Inductor aus dünnem oder dickem Draht gebildet ist, nennt man ihn manchmal einen Spannungsinductor oder einen Quantitätsinductor.

Bei manchen Maschinen ist die Einrichtung getroffen, dass man nach Belieben einen Quantitäts- oder einen Spannungsinductor einsetzen kann. Denselben Zweck, welchen man durch Vertauschung der Inductoren erreicht, kann man auch durch eine Vorrichtung erreichen, welche erlaubt, die beiden Spiralen auf verschiedene Weise zu combiniren. Eine solche Vorrichtung führt den Namen Pachytrop. Betrachten wir denselben etwas näher.

Jede der beiden rotirenden Spiralen bildet für sich einen Elektromotor, man kann also die beiden Spiralen in gleicher Weise wie zwei Volta'sche Becher gleichsam hinter einander zu einer Säule von zwei Elementen, oder neben einander zu einem einzigen Elemente vereinigen,

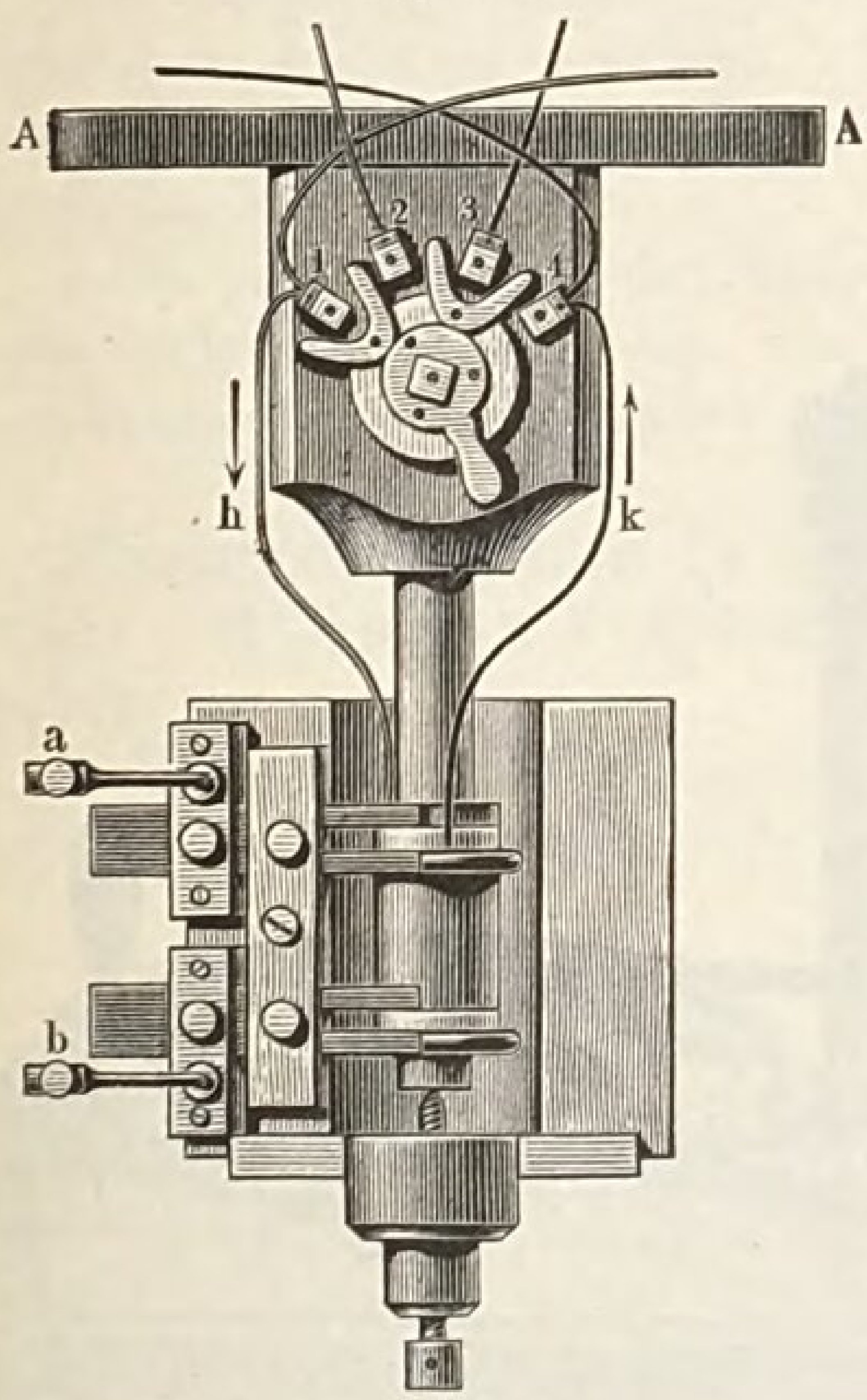
dessen Leitungswiderstand nur halb so gross ist, als der einer einzelnen Spirale.

Der Pachytrop, welchen Stöhrer an seinen mittelgrossen Maschinen anbringt, hat folgende aus Fig. 618 zu ersehende Einrichtung.

Es stellt *AA* die eiserne Platte dar, welche die eisernen Kerne der beiden Drahtrollen trägt und durch deren Mitte die Rotationsaxe des ganzen Apparates geht; an derselben ist, dem Commutator zugewendet, ein auf zwei Seiten abgeflachtes Stück Holz befestigt, welches auf der einen Seite die fragliche Vorrichtung trägt.

Auf der Holzfläche sind zunächst vier Kupferplättchen befestigt, welche in Fig. 618 mit 1, 2, 3 und 4 bezeichnet sind. An 1 und 2 sind zwei gleichnamige Drahtenden der beiden Drahtspiralen befestigt, die beiden anderen Drahtenden bei 3 und 4. Nehmen wir z. B. an, das von der Spirale rechts kommende Drahtende, welches bei 1 befestigt ist, sei für einen bestimmten Moment positiv, so ist dasjenige Drahtende der linken Spirale, welches gleichzeitig positiv ist, in 2 befestigt. — Das bei 4 befestigte Drahtende führt zur linken, das bei 3 befestigte Drahtende führt zur rechten Spirale; diese beiden sind in dem eben besprochenen Momente negativ.

Fig. 618.



Von 1 führt ein Kupferdraht *h* zum ersten, von 4 ein anderer *k* zum zweiten halbkreisförmigen Kamme des Commutators.

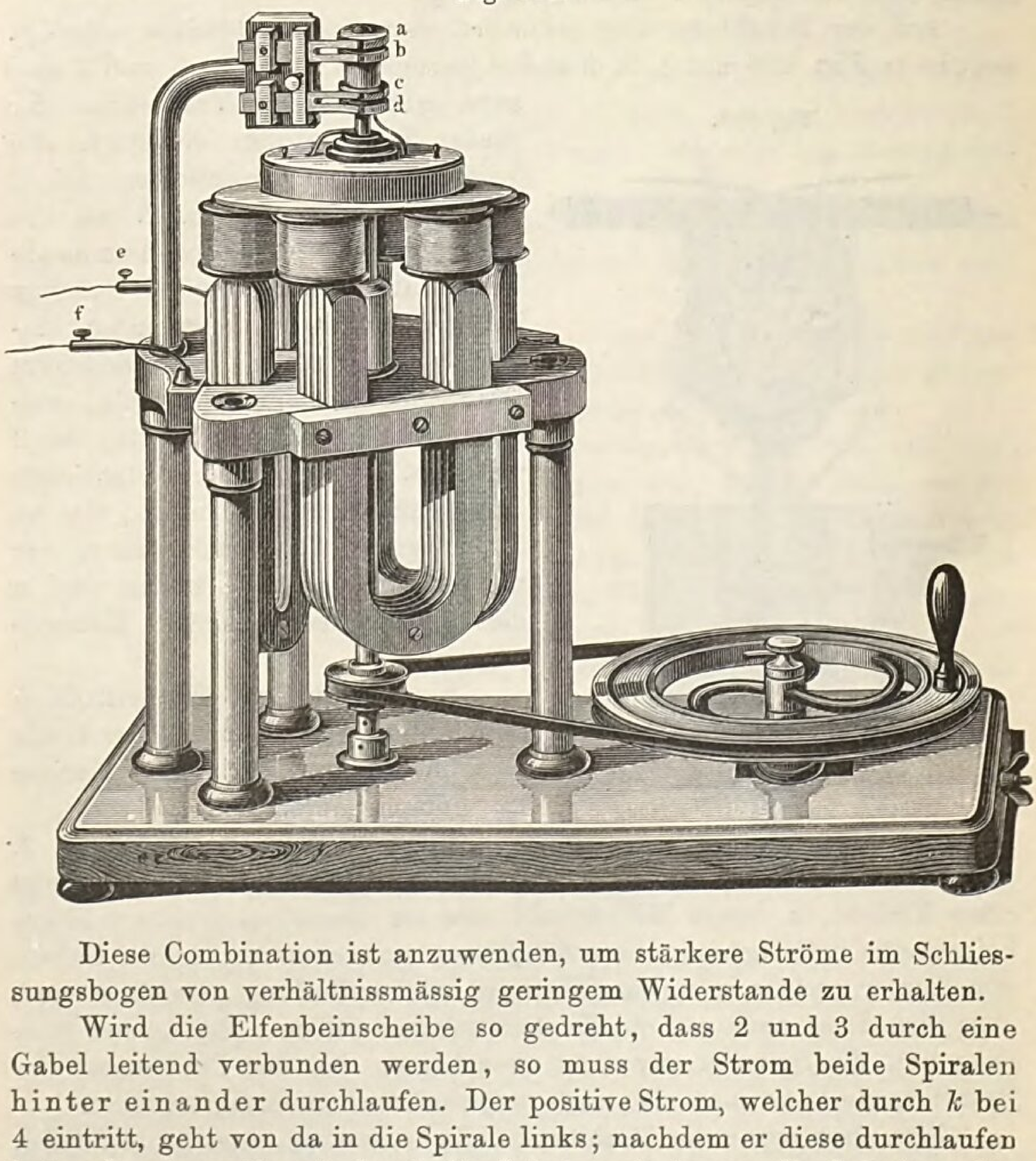
Die vier Kupferstückchen 1, 2, 3 und 4 liegen auf dem Umfange eines Kreises, in dessen Mittelpunkt eine um denselben drehbare Elfenbeinscheibe befestigt ist; diese trägt zwei von einander isolirte Gabeln von Kupfer, welche in unserer Figur in solcher Stellung gezeichnet sind, dass ihre Arme nicht auf die Kupferstückchen fallen. Bei solcher Stellung sind die Spiralen gar nicht geschlossen; bei der Umdrehung der Rotationsaxe kann man also auch keinerlei Stromwirkung erhalten.

Nun aber werde die Elfenbeinscheibe so gedreht, dass 1 und 2 durch die eine, 3 und 4 durch die andere Gabel verbunden sind. Der positive Strom der Spirale rechts kommt jetzt direct nach 1, der positive Strom der Spirale links kommt über 2 durch die Gabel gleichfalls nach 1, der Draht *h* führt also die positiven Ströme beider Spiralen dem ersten Kamme des Commutators zu, während er nachher durch den Draht *k*

nach 4 gelangt, um sich hier zu theilen, indem er von 4 direct zur linken und durch die zweite Gabel über 3 zur rechten Spirale gelangt. Der Strom, welcher den Schliessungsbogen zwischen *a* und *b* durchläuft, geht also zur Hälfte durch die eine, zur Hälfte durch die andere Spirale.

Betrachtet man jede Spirale als einen Stromerzeuger, so sind hier gleichsam die beiden Stromerzeuger neben einander combinirt; die elektromotorische Kraft ist dieselbe, der Widerstand ist halb so gross als für eine Spirale allein.

Fig. 619.



Diese Combination ist anzuwenden, um stärkere Ströme im Schliessungsbogen von verhältnissmässig geringem Widerstande zu erhalten.

Wird die Elfenbeinscheibe so gedreht, dass 2 und 3 durch eine Gabel leitend verbunden werden, so muss der Strom beide Spiralen hinter einander durchlaufen. Der positive Strom, welcher durch *k* bei 4 eintritt, geht von da in die Spirale links; nachdem er diese durchlaufen hat, gelangt er über 2 durch die Gabel nach 3, um die Spirale rechts zu durchlaufen und dann über 1 und *h* zum Commutator zu gelangen.

Für diese Combination sind also gewissermaassen die beiden elektromotorischen Elemente zur Säule verbunden, man hat die doppelte elektromotorische Kraft und den doppelten Widerstand einer einzigen

Spirale, die elektromotorische Kraft ist also doppelt, der Widerstand viermal so gross als für die zuerst genannte Combination.

Diese Combination der Spiralen ist in solchen Fällen zu wählen, wo ein grösserer Widerstand in den Schliessungsbogen eingeschaltet ist; bei dieser Stellung der elfenbeinernen Scheibe erhält man auch die stärksten physiologischen Wirkungen.

Stöhrer hat grössere Rotationsapparate, Fig. 619, mit drei aufrecht stehenden Magneten und sechs Inductionsrollen construirt, welche gleichfalls durch ein Pachytrop, welches aber natürlich complicirter ist, auf verschiedene Weise combinirt werden können.

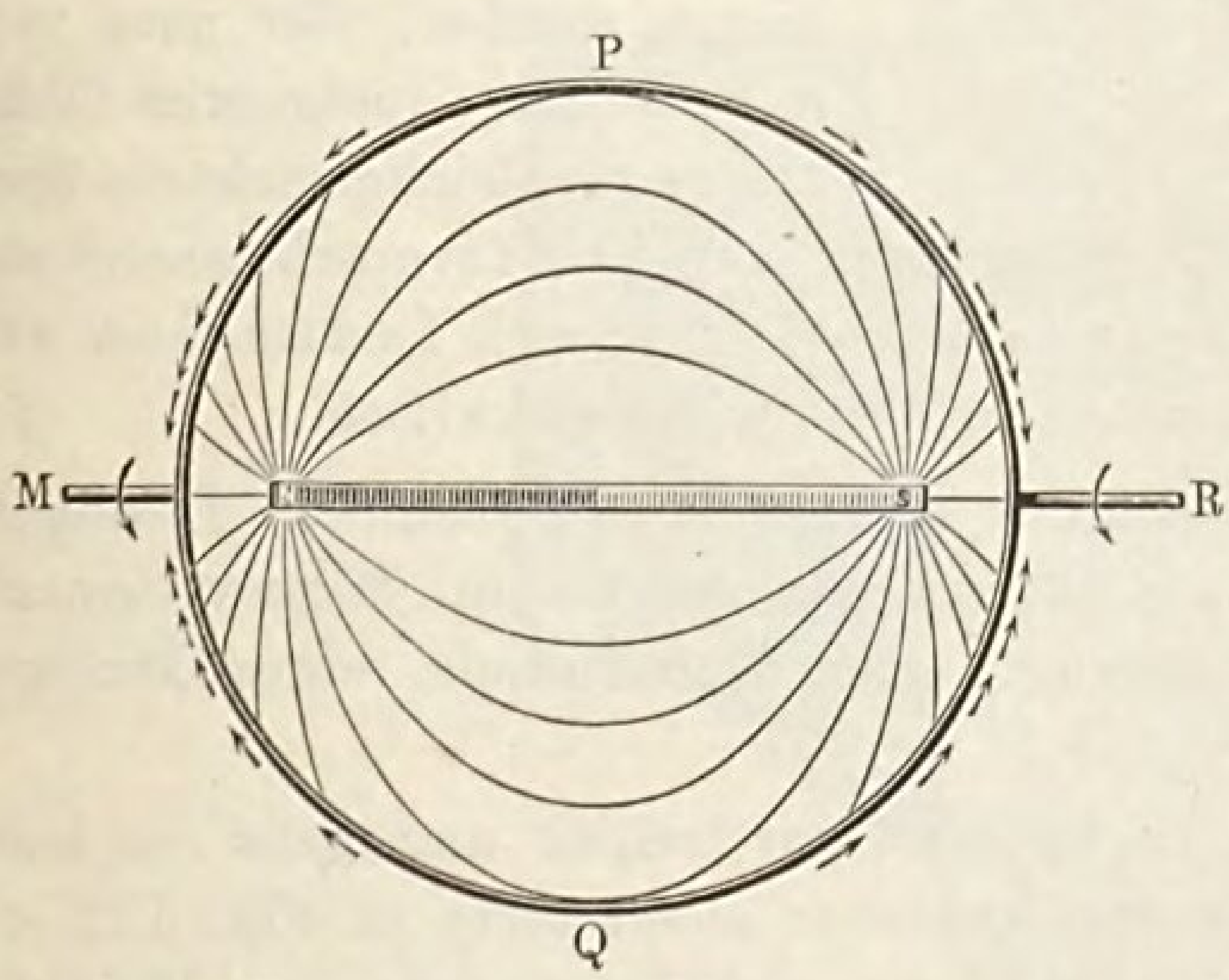
Noch grösser waren die magnetelektrischen Maschinen, welche Nollet in Brüssel construirt hat und welche in verbesserter Form von der Gesellschaft „l'Alliance" benutzt wurden, um die Leuchtthürme mit elektrischem Licht zu versorgen. Da jedoch diese Maschinen durch die dynamoelektrischen längst überholt sind, so wollen wir ihre nähere Beschreibung hier übergehen.

Auch hier lässt sich der Inductionsapparat umgekehrt als elektromagnetischer Motor benutzen. In der That beruhen die im §. 184 beschriebenen Motoren sämmtlich auf derartigen Anordnungen.

Magnetoinduction in einem rotirenden geschlossenen Leiter. Stöhrer's elektromagnetischer Motor und Inductor. 200

I. Fall. Der Leiter umschliesst mit seiner Rotationsfläche den Magnet, die Rotationsaxe fällt mit der Magnetaxe zusammen. Die Fig. 620 stellt diesen Fall für einen kreisförmigen Leiter vor. Die Anwendung der Faraday'schen Regel lässt uns für alle Stellen des Ringes die Stromrichtungen ausmitteln, welche in der Figur durch Pfeile angedeutet sind. Die resultirende Gesammtstromrichtung im Ringe muss gleich Null sein, da in Bezug auf denselben jedem Elementarstrome ein gleicher entgegengesetzter entspricht. Auch nach der Maxwell'schen Regel erhalten wir dasselbe Resultat, denn da stets alle nicht in der Ebene des Leiters verlaufenden Kraftlinien dieselbe durchsetzen, so bleibt die Anzahl derselben constant, kommt also kein Strom zu Stande. Dies würde eben so gelten, wenn der Leiter irgend

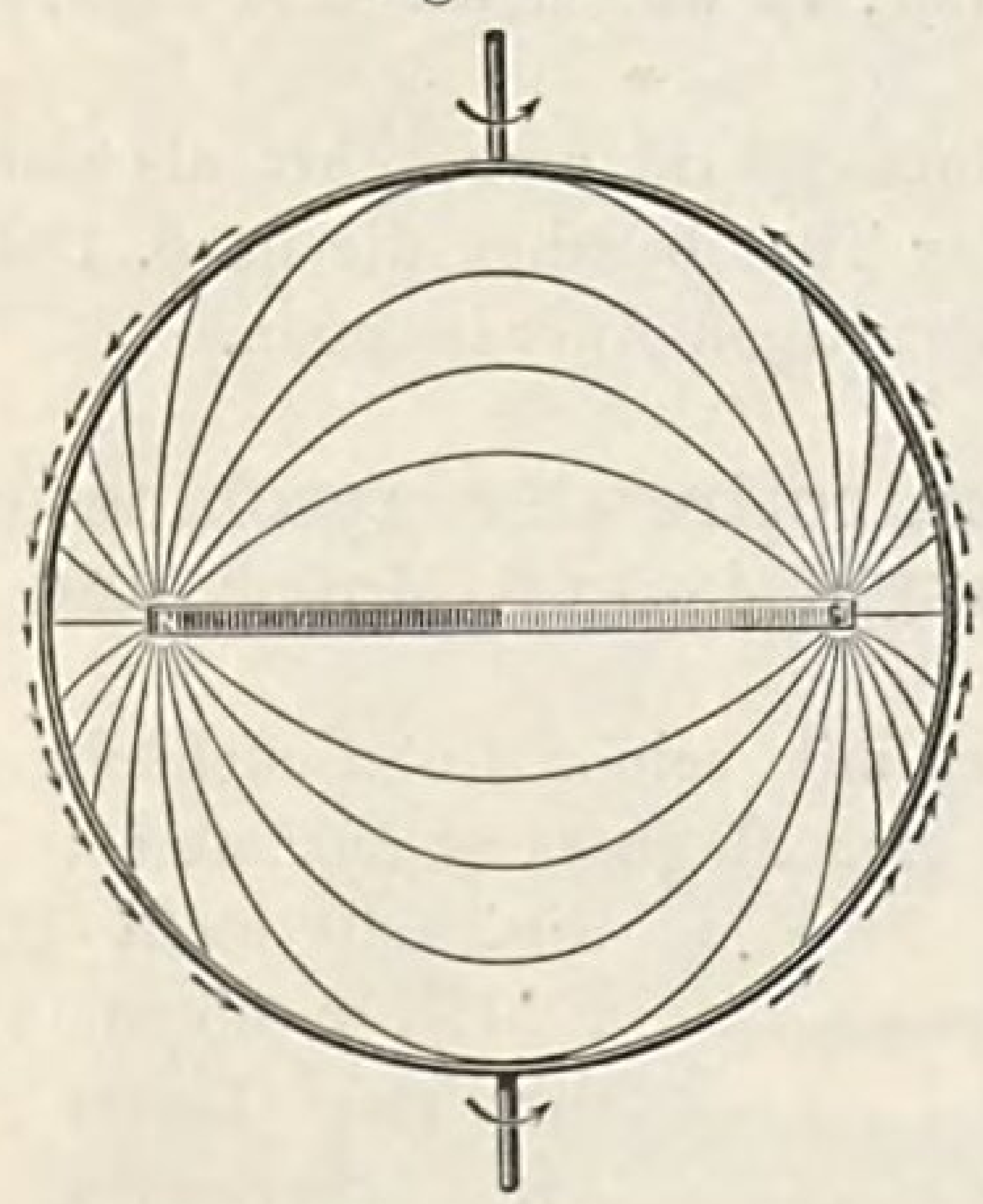
Fig. 620.



eine andere Form hätte, auch dann, wenn er nicht in einer Ebene liegen würde. Etwas anderes wäre es, wenn wir die Enden der Axen *M* und *R* einerseits, einen Schleifcontact bei *P* und *Q* andererseits durch einen Schliessungskreis verbinden würden. Wir erhielten eine Strömung, welche im Ringe von *P* und *Q* nach *M* und *R* führte.

II. Fall. Der Leiter umschliesst, wie im Falle I., mit seiner Rotationsfläche den Magnet, die Rotationsaxe steht aber senkrecht zur Magnetaxe. Fig. 621 zeigt diesen Fall. Die Faraday'sche Regel lässt uns erkennen, dass jede durchschnittene Kraftlinie einen Strom liefert, der in Bezug auf den Leiter dieselbe Richtung hat. Es resultirt also ein Gesammtstrom. Derselbe wechselt aber jedesmal das Zeichen, so oft die Ebene des Leiters senkrecht auf die Magnetaxe zu stehen kommt. Dasselbe ergiebt die Maxwell'sche Regel, denn die Anzahl der die Ringebene durchsetzenden Kraftlinien nimmt von ihrem Maximum bis auf ein Minimum, welches von der Ringweite abhängt, ab und dann wieder zu. Lässt man umgekehrt den Magnet innerhalb eines feststehenden Leiterkreises oder einer Drahtrolle, deren Windungsebene durch die Rotationsaxe geht, rotiren, so erhält man ebenso bei jeder Umdrehung zwei entgegengesetzte Ströme, welche Wechselströme genannt werden, die man jedoch mittelst eines geeigneten Commutators in gleichgerichtete Ströme verwandeln kann. Ohne Commutator ist es demnach nicht möglich, in einem geschlossenen Leiter durch Induction einen fortwährend gleichgerichteten Strom zu erhalten.

Fig. 621.



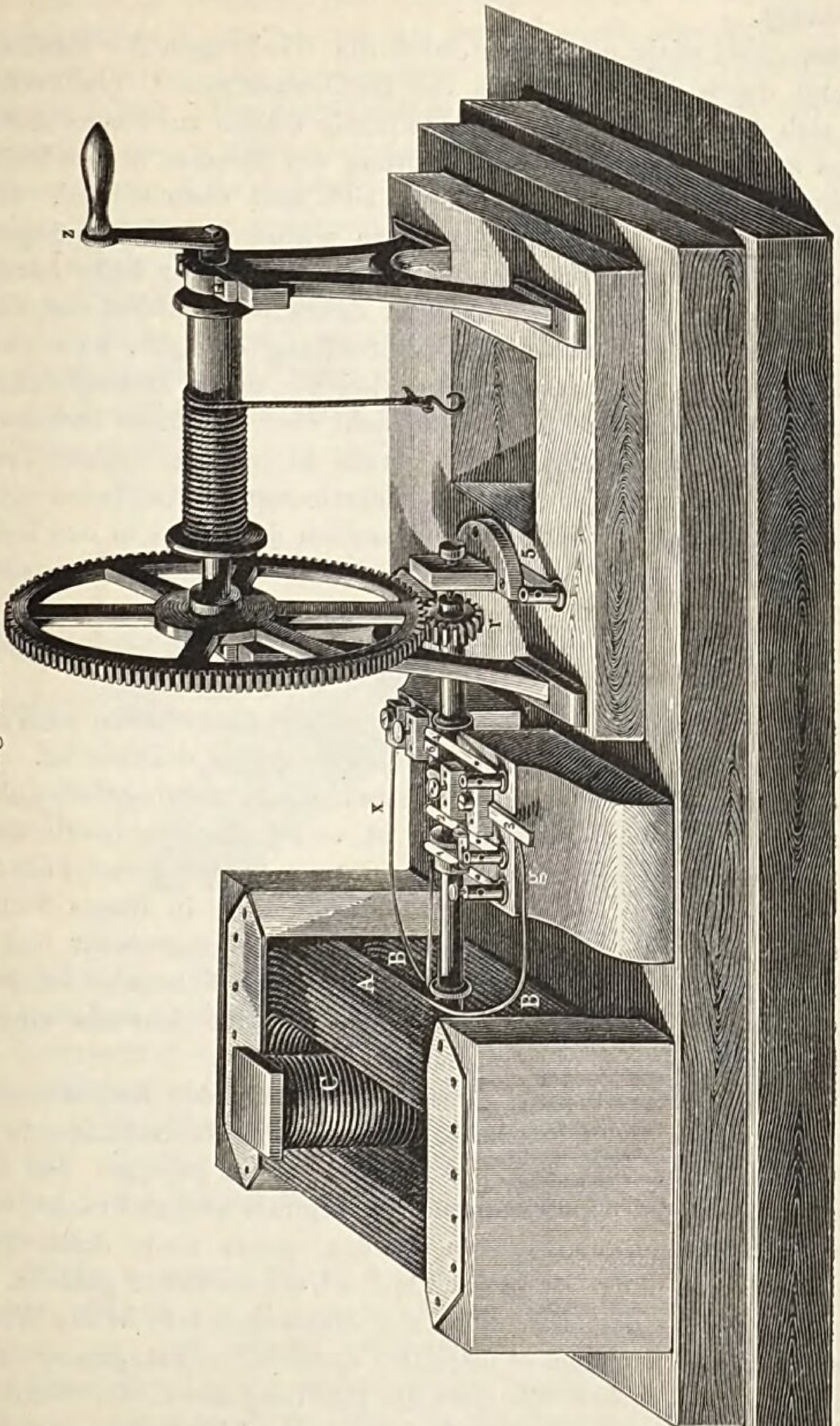
Die dieser Inductionswirkung entsprechende reciproke Bewegungswirkung ist die oft erwähnte Ablenkung, welche ein Magnet innerhalb des Stromkreises einer Tangenten- oder Sinusbussole, eines Multiplicators etc. erfährt.

Als ein hierher gehöriger Apparat, der freilich nur mehr ein historisches Interesse hat, ist der von Stöhrer construirte in Fig. 622 abgebildete anzusehen, welcher sowohl als elektromagnetischer Motor, als auch umgekehrt als Inductionsapparat verwendet werden kann.

A und *B* sind zwei längliche Rahmen, welche aus übersponnenem Kupferdraht gebildet sind, der ungefähr 2 mm im Durchmesser hat. Die Drahtwindungen, welche den oberen Rahmen bilden, sind durch ein kurzes Drahtstück mit denen des unteren verbunden, so dass der Strom

aus dem oberen Rahmen in den unteren übergeht; die Windungen beider Rahmen sind der Art, dass ein elektrischer Strom beide in gleicher Richtung durchläuft.

Fig. 622.



Zwischen dem oberen und dem unteren Drahtrahmen ist ein solcher Zwischenraum gelassen, dass die Umdrehungsaxe des Elektromagnets *C* sich frei bewegen kann.

Der Eisenkern des Elektromagnets ist an jedem Ende mit einer Eisenplatte versehen, welche einestheils die Drahtwindungen des Elektromagnets hält, anderentheils aber auch sehr zur Verstärkung der Wirkung beiträgt.

Wenn gleichzeitig ein Strom durch die Windungen der Rahmen *A* und *B* und durch die Windungen des Elektromagnets *C* hindurchgeht, so wird sich der Elektromagnet rechtwinklig stellen zur Ebene der Rahmen; und zwar wird, je nach der Richtung des Stromes in den Rahmen, ein bestimmter Pol des Elektromagnets sich nach oben kehren. Bliebe der Strom in den Rahmen ungeändert, so würde der Elektromagnet in dieser Gleichgewichtslage nach einigen Oscillationen zur Ruhe kommen; wird aber der Strom in den Rahmen in demselben Moment umgekehrt, in welchem der Magnet seine verticale Stellung erreicht, so wird nun die Rotation fortdauern müssen, denn bei der neuen Stromrichtung in den Rahmen kann der Elektromagnet nicht eher zur Ruhe kommen, als bis der eben oben angekommene Pol gerade nach unten gerichtet ist; es wird also eine beständige Rotation des Elektromagnets stattfinden müssen, wenn nach jeder halben Umdrehung desselben der Strom in den Rahmen umgekehrt wird, während die Polarität des Elektromagnets ungeändert bleibt.

Sehen wir nun, wie der Strom durch den Apparat hindurchgeleitet wird.

Die Umdrehungsaxe des Elektromagnets läuft zwischen zwei Stahlspitzen, von denen nur die eine in unserer Figur sichtbar ist. Diese Spitze steckt mit einem Schraubengewinde in einem Messingpfeiler, dessen Fuss fest auf den Boden aufgeschraubt ist, so dass eine innige Berührung zwischen diesem Messingfusse und dem Kupferstreifen 5 stattfindet, auf dessen vorderem Ende ein Messingsäulchen sitzt. In dieses Säulchen kann der eine Poldraht einer galvanischen Kette eingesteckt und mittelst einer Schraube festgeklemmt werden. (Die Schraube ist in der Figur weggelassen worden; dies Säulchen und seine Schraube sind dem auf der Feder 1 stehenden ganz gleich.)

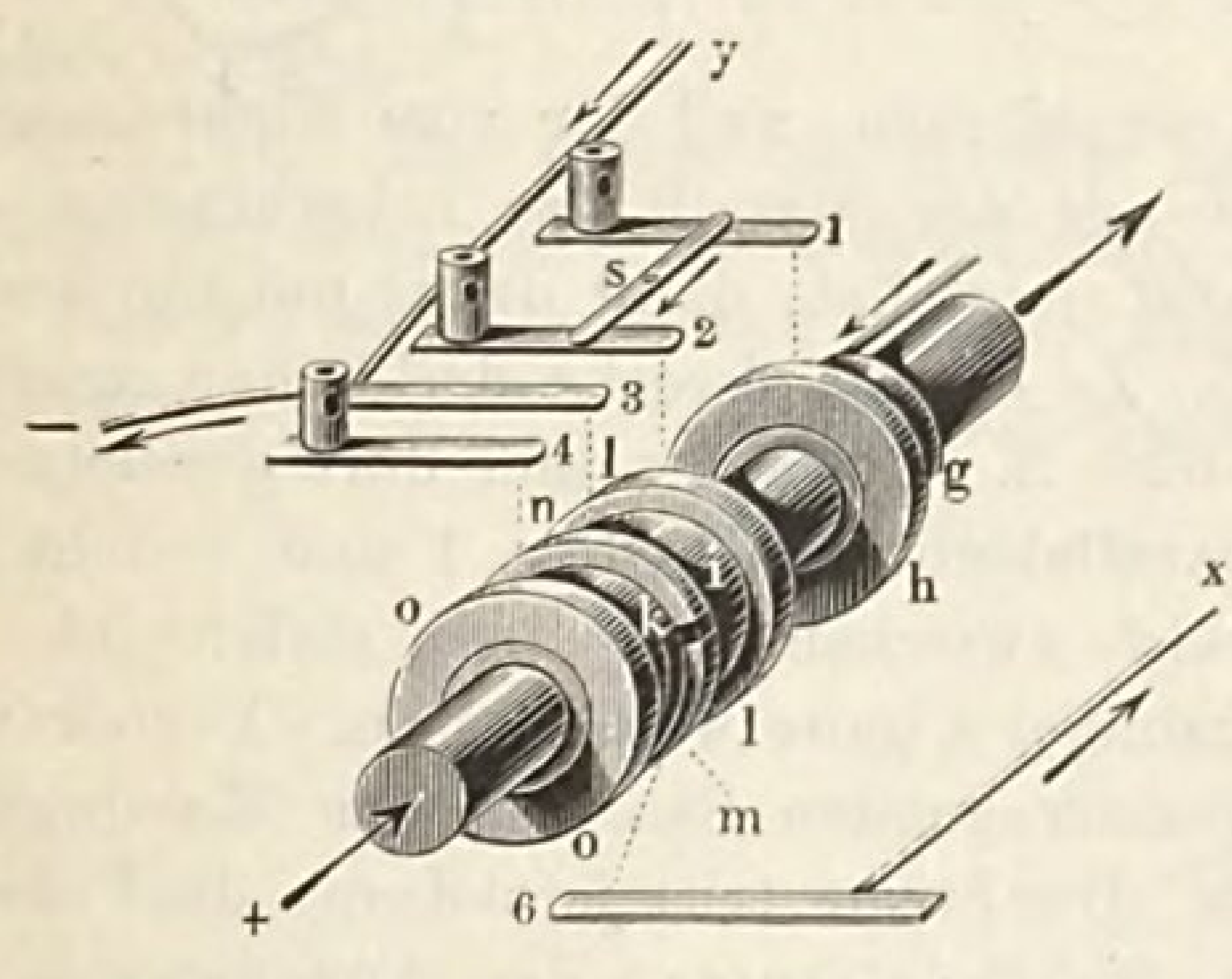
Der Strom tritt also durch dies Säulchen und den Kupferstreifen 5 in den Apparat ein, geht durch die Spitze in die Umdrehungsaxe über, durch welche er zum Eisenkern des Elektromagnets gelangt. Auf diesen Eisenkern ist nun das eine Drahtende der Spirale aufgeschraubt, welche um den Eisenkern herumgewunden ist; das andere Ende dieser Spirale ist zu dem alsbald näher zu betrachtenden Commutator geleitet. Der Strom geht also aus dem Eisenkern des Elektromagnets in die Windungen desselben, und nachdem er dieselben durchlaufen hat, gelangt er zum Commutator, welcher bewirkt, dass die Richtung des in die Windungen der Rahmen geleiteten Stromes nach jeder halben Umdrehung in denselben umgekehrt wird.

Die Einrichtung dieses Commutators ist aus Fig. 623 deutlicher zu ersehen. Das eine Ende der Drahtwindungen des Elektromagnets ist

auf die Metallhülse *g*, Fig. 623, aufgeschraubt, welche, wie auch die kupfernen Hülsen *i* und *k*, durch eine hölzerne Hülse, auf der sie stecken, vor metallischer Berührung mit der eisernen Axe geschützt ist. Die Hülse *g* trägt den ganz kreisförmigen metallischen Kamm *h*; an dem hinteren Ende der Hülse *i* befindet sich der ganze kreisförmige Kamm *l*, auf der vorderen Seite von *i* ist der Kamm *m* befestigt, welcher jedoch nur einen Halbkreis bildet. Der halbkreisförmige Kamm *n*, welcher gleichsam die Fortsetzung von *m* bildet, ist durch die Hülse *k* mit dem ganz kreisförmigen Kamm *o* in leitender Verbindung, aber durch eine isolirende Substanz von *m* und *i* getrennt, wie man dies in Fig. 624 deutlicher sieht. In Fig. 623 sind der Deutlichkeit halber die Dimensionen von vorn nach hinten bedeutend vergrössert aufgetragen; ferner sind die Federn 1, 2, 3, 4 und 6 als von den Kämmen, auf denen sie schleifen sollen, weggerückt gezeichnet.

Auf *h* schleift die Feder 1, auf *l* die Feder 2, auf *o* die Feder 4. Die Feder 3 schleift oben, die Feder 6 schleift unten an dem aus den Theilen *m* und *n* bestehenden mittleren Kamm und zwar so, dass *n* und 3 in Berührung sind, wenn *m* und 6 sich berühren; wenn aber während der Rotation *m* mit 3 in Berührung kommt, so kommt unten *n* mit 6 in Berührung.

Fig. 623.



Nehmen wir an, der positive Pol der Kette sei in das Säulchen des Streifens 5, der negative Poldraht in das Säulchen der Feder 4 eingeschraubt, so geht der positive Strom, nachdem er den Elektromagnet umkreist hat, nach *g* und *h*, von da durch die Feder 1 und den kupfernen Querstreifen *s* auf die Feder 2, dann nach *l*, *i* und *m*; der halbkreisförmige Kamm *m* ist also gleichsam ein + Pol; von *m* geht der positive Strom auf diejenige der Federn 6 oder 3 über, die er gerade berührt.

Der negative Strom tritt durch die Feder 4 ein und gelangt von da über *o* und *k* nach *n*, so dass also *n* gleichsam der negative Pol der Kette ist.

Wenn *m* gerade mit 6, *n* aber mit 3 in Berührung ist, so tritt der positive Strom von 6 aus durch den Draht *x* in die Windungen der Rahmen ein, und gelangt, nachdem er diese Windungen durchlaufen hat, durch den Draht *y* und die Feder 3 nach *n*; nach einer halben Umdrehung aber kommt *m* mit 3 in Berührung, jetzt tritt der positive Strom durch die Feder 3 und den Draht *y* in die Windungen der Rahmen ein, durch *x* und 6 aber aus, bei jeder halben Umdrehung der Axe findet also eine Umkehrung der Stromrichtung in den Rahmen

statt, wodurch dann die fortdauernde Rotation des Elektromagnets bewerkstelligt wird.

An der Umdrehungsaxe des Elektromagnets ist das kleine Zahnrad *r*, Fig. 622, S. 737, befestigt, welches in ein grösseres eingreift. Um die Axe dieses grösseren Zahnrades ist eine Schnur geschlungen, an welche ein passendes Gewicht gehängt werden kann, welches dann durch die Rotation des Elektromagnets gehoben wird.

Fig. 624.

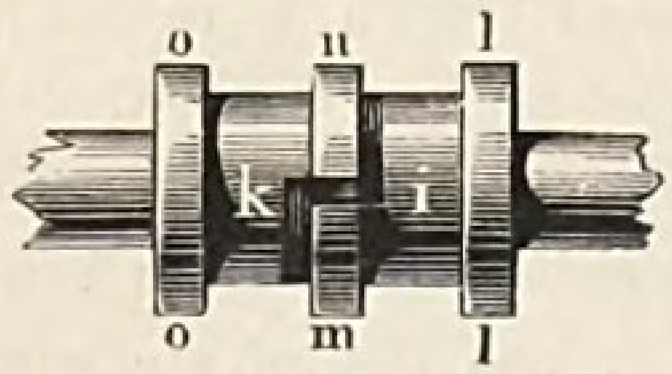
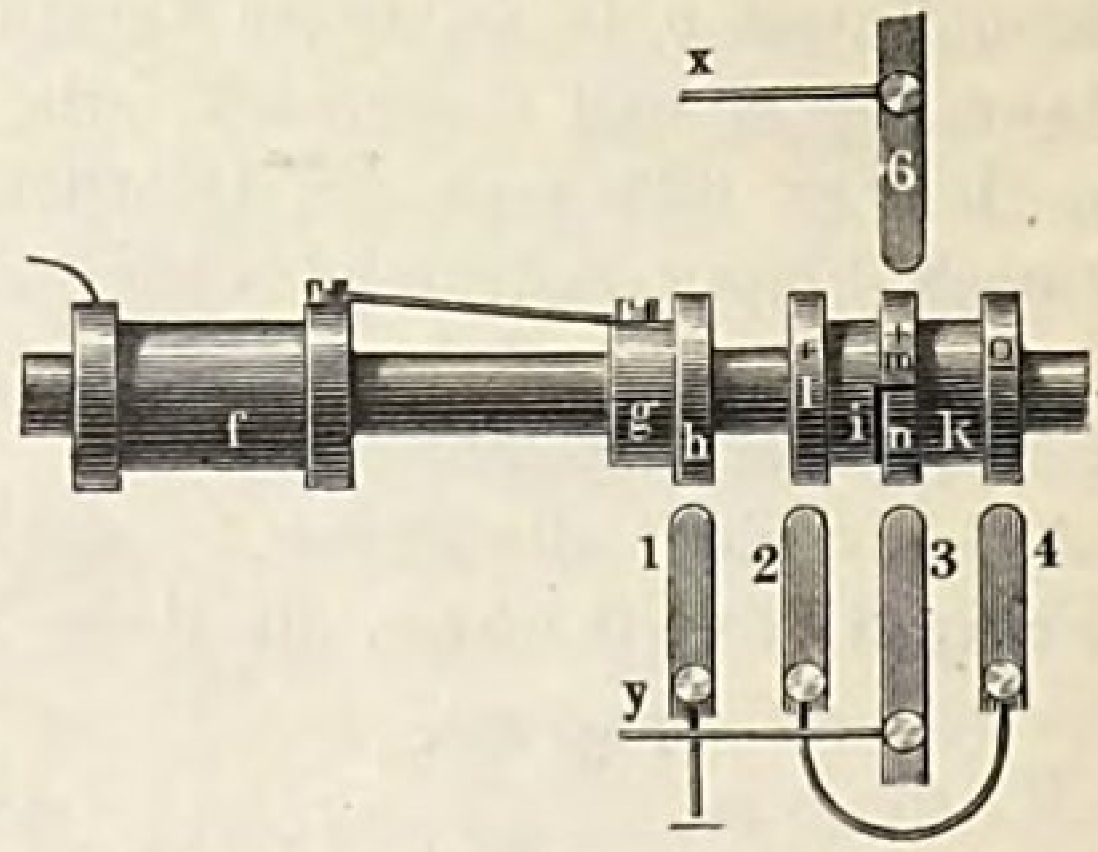


Fig. 625.



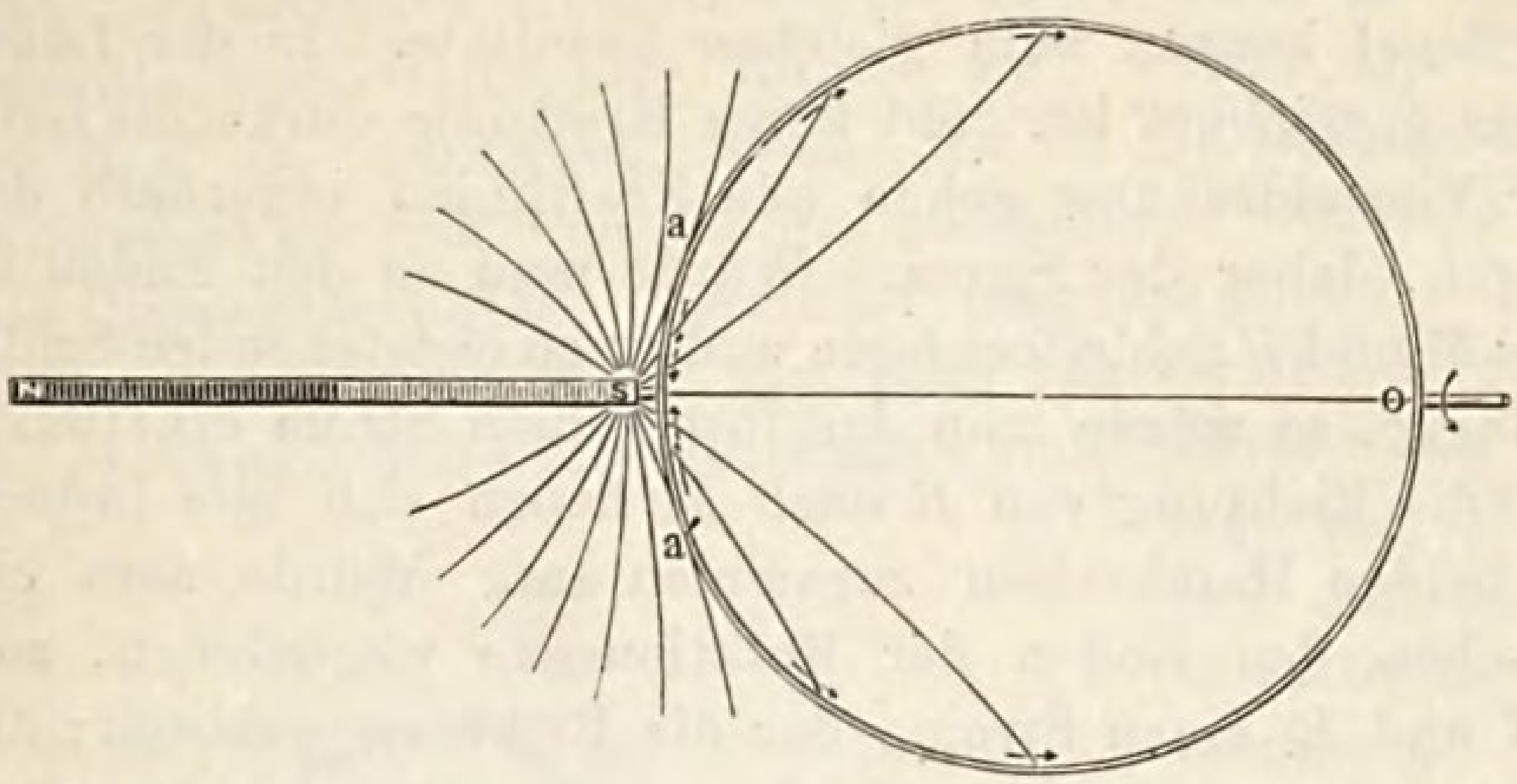
Sollte der Apparat nur zu dem oben angegebenen Zwecke dienen, so könnte er etwas einfacher sein; *g*, *h* und der Kamm *l* nebst den Federn 1 und 2 könnten ganz wegbleiben, und der vom Elektromagnet kommende Kupferdraht direct mit der Metallhülse *i* verbunden sein. Die Einrichtung, die der Apparat jetzt hat, dient dazu, um ihn als Inductionsapparat zu gebrauchen. Zu diesem Zwecke dreht man zunächst den Verbindungsbügel *s*, Fig. 623, S. 739, aus seiner dort gezeichneten Lage um 90° um, so dass er parallel mit den Federn 1 und 2 steht und keine leitende Verbindung mehr zwischen denselben stattfindet. In Fig. 625 ist dieser Verbindungsbügel *s* ganz weggelassen. Ferner wird der negative Poldraht der stromerregenden Säule in das Messingsäulchen der Feder 1 eingeschraubt. Der Strom tritt jetzt durch die Feder 5, Fig. 622, ein, gelangt durch die Rotationsaxe des Apparates in die Windungen des Elektromagnets und tritt durch die Feder 1 aus, ohne in die Windungen der Rahmen eintreten zu können. Wird nun der Elektromagnet mit Hülfe der Kurbel *z*, Fig. 622, umgedreht, so entsteht in den Windungen der Rahmen ein Inductionsstrom, sobald die Säulchen der Federn 2 und 4 in leitende Verbindung gebracht werden.

Da dieser Inductionsstrom durch den Commutator geht, so erhält man ihn gleich commutirt, d. h. stets in gleicher Richtung und nicht bei jeder halben Umdrehung richtungswechselnd, wie er in den Spiralen ursprünglich entstand.

III. Fall. Der Magnet steht ausserhalb der Rotationsfläche des geschlossenen Leiters, die Rotationsaxe fällt mit der Magnetaxe zusammen (Fig. 626). Die Faraday'sche Regel lässt erkennen, dass die elektromotorischen Kräfte eine Gesammtresultirende = Null ergeben müssen, denn jede Kraftlinie wird zweimal und zwar das zweite Mal in entgegengesetztem Sinne geschnitten. Da um die Axe herum Alles

symmetrisch ist, so ändert sich nicht die Anzahl der die Leiterfläche durchsetzenden Kraftlinien, es ergiebt also auch die Maxwell'sche Regel keinen Strom. Ein solcher wäre zu erhalten, wenn bei a und a',

Fig. 626.

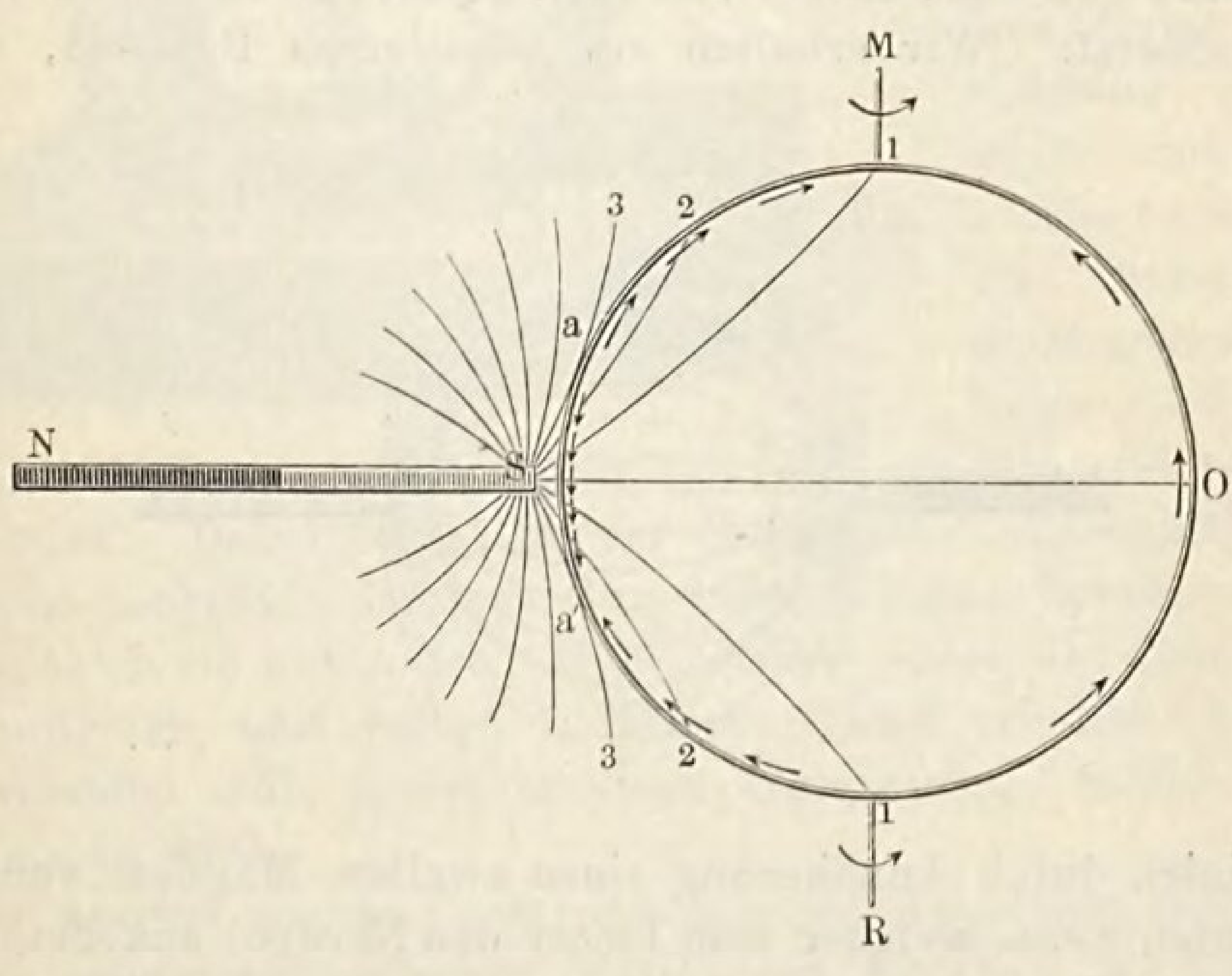


wo die Kraftlinien den Leiter berühren, Schleifcontacte angebracht wären, die durch eine äussere nicht rotirende Leitung mit den Axenenden verbunden werden.

IV. Fall. Der Leiter hat dieselbe Lage zum Magneten, rotirt aber um eine zur Magnetaxe senkrechte Axe, Fig. 627.

Wenden wir die Faraday'sche Regel an, so sehen wir ein, dass alle Kraftlinien, welche von der Magnetaxe weiter entfernt liegen, als die

Fig. 627.

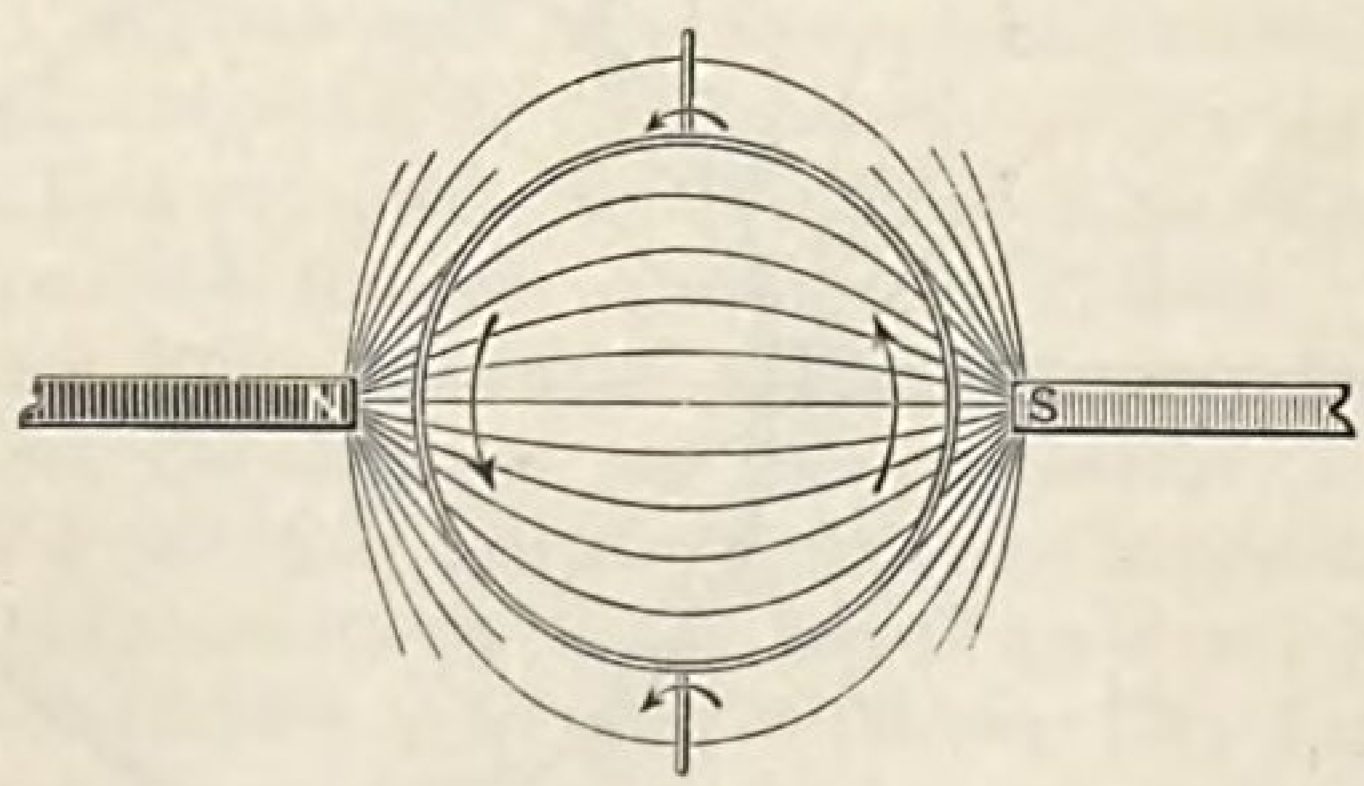


durch die Endpunkte 1,1 der Rotationsaxe gehende Kraftlinie, entweder zweimal entgegengesetzt, oder gar nicht geschnitten werden. In der Figur z. B. werden alle Kraftlinien zwischen 1 und 3 zweimal entgegengesetzt, die übrigen weiter von der Magnetaxe entfernten gar nicht geschnitten. Diejenigen Kraftlinien, welche in den Raum fallen, welcher innerhalb der

Rotationsfläche der Kraftlinie *S* 1 gegen die Axe *S O* hin liegt, schneiden den Leiter zweimal, aber beide Male im gleichen Sinne in Bezug auf die Stromrichtung im Leiter. Diese Durchschneidungen werden daher einen resultirenden Gesammtstrom im Leiter geben, der aber ebenfalls bei jeder halben Umdrehung die Richtung im Leiter wechselt. Die Maxwell'sche Regel kommt zum gleichen Resultate. In der Lage, welche in der Figur gezeichnet ist, geht keine Kraftlinie durch die Leiterfläche. Nach einer Vierteldrehung gehen alle Kraftlinien innerhalb der Linien *S* 1 hindurch, daher der Strom. Würde man an den Enden der Rotationsaxe bei *M* und *R* Schleifcontacte und einen feststehenden Schliessungskreis anbringen, so würde man daselbst keinen Strom erhalten, denn in Bezug auf die Richtung von *R* nach *M* heben sich alle Inductionswirkungen in beiden Halbkreisen zusammen auf. Würde man eine Ringhälfte zwischen den Enden der Rotationsaxe wegnehmen, so erhielte man bei *M* und *R* einen Strom, der die Richtung wechselt; die andere Ringhälfte würde genau den gleich starken entgegengesetzten Strom liefern, beide Ringhälften zusammen daher keinen Strom von *R* nach *M* oder umgekehrt, wohl aber einen Strom im Kreise herum.

201 **Magnetoinduction in einem geschlossenen Leiter, welcher zwischen entgegengesetzten Polen rotirt. Siemens' Cylinderinductor, v. Hefner-Alteneck's magnetelektrische Trommelmaschine.** Die Lage der Kraftlinien ist in Fig. 627 offenbar keine günstige, da eine zu geringe Menge derselben die Leiterfläche durchsetzt. Wir erhalten ein günstigeres Resultat, wenn wir

Fig. 628.

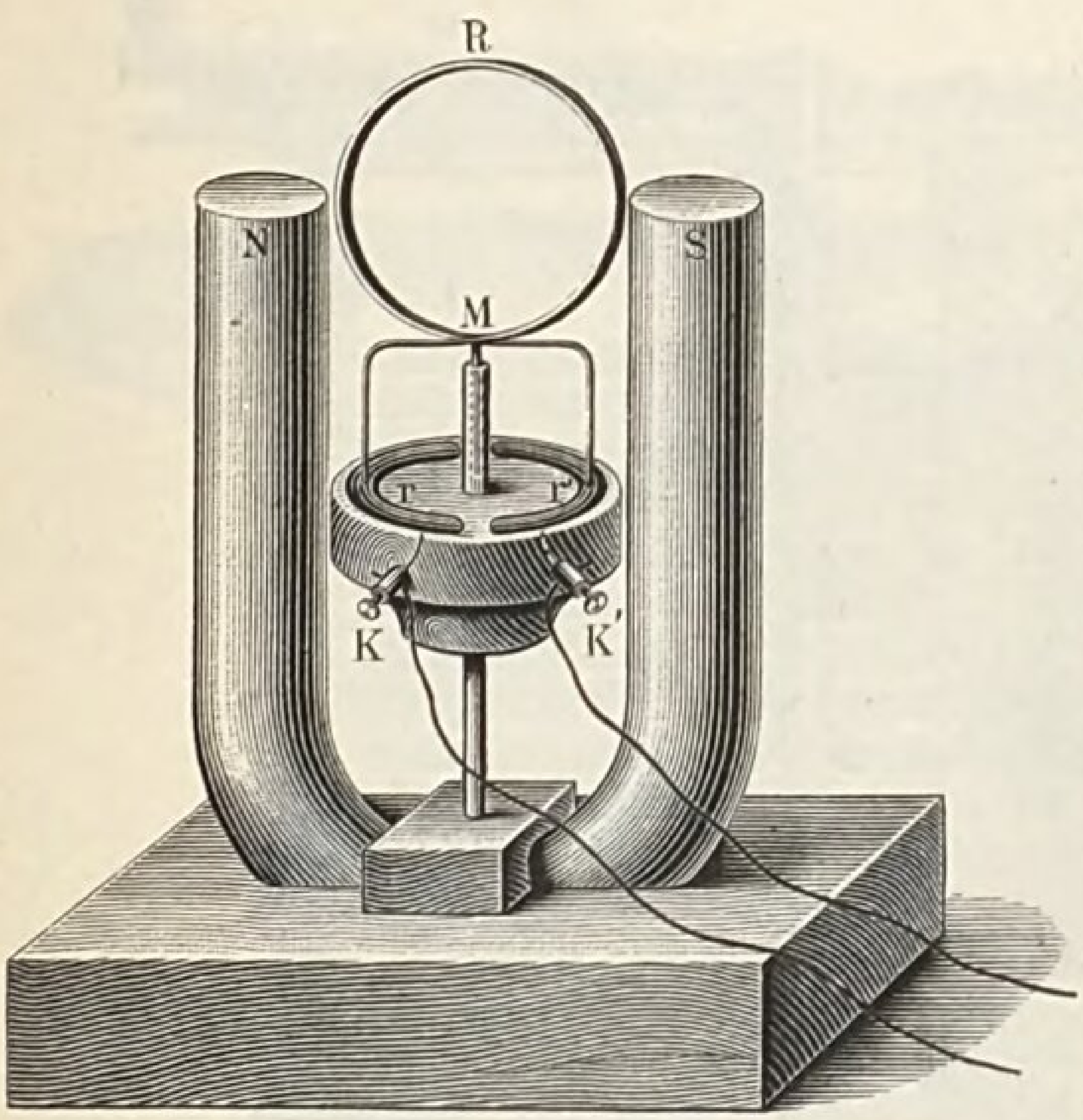


den Kraftlinien durch Annäherung eines zweiten Magnets von der entgegengesetzten Seite, welcher dem Leiter den Nordpol zukehrt, eine vorwiegende Direction gegen die Verlängerung der Magnetaxe ertheilen. Die Fig. 80 a. S. 92 lässt uns erkennen, wie die Kraftlinien zweier so zu einander gestellter Magnete verlaufen. Sie müssen zwischen den entgegengesetzten Polen der beiden Magnete ungefähr denselben Verlauf nehmen, wie die Kraftlinien zwischen den beiden Polen eines

Magnets. Fig. 628 zeigt diesen Verlauf. Noch einfacher ersetzt man die beiden Magnete durch einen Hufeisenmagnet.

Die Fig. 629 stellt eine derartige Versuchsanordnung dar. Der aus mehreren Windungen übersponnenen Drahtes zusammengesetzte Ring *RM* kann um die verticale Axe zwischen den Polen *N* und *S* rotiren. Seine beiden Drahtenden tauchen hierbei in zwei mit Quecksilber übervoll angefüllte halbkreisförmige Rinnen *rr'*, welche mit den Klemmschrauben *K*, *K'* in Verbindung stehen. So oft die Ringebene senkrecht zur Verbindungslinie der Pole zu stehen kommt, wechseln die Drahtenden die Quecksilbernäpfe. Verbindet man die Klemmschrauben mit einem Galvanometer und macht den Ring mit der Hand rotiren, so erhält man gleichgerichtete intermittirende Inductionsströme. Verbindet man die Klemmschrauben mit einer Batterie, so rotirt der Ring. Zu letzterem Zwecke ist der Apparat eigentlich construirt. Aenderung der Stromrichtung ändert auch die Rotationsrichtung und umgekehrt. Wäre aber der Magnet ein von demselben Strom geladener Elektromagnet, so würde Aenderung der Stromrichtung die Rotation nicht umkehren.

Fig. 629.

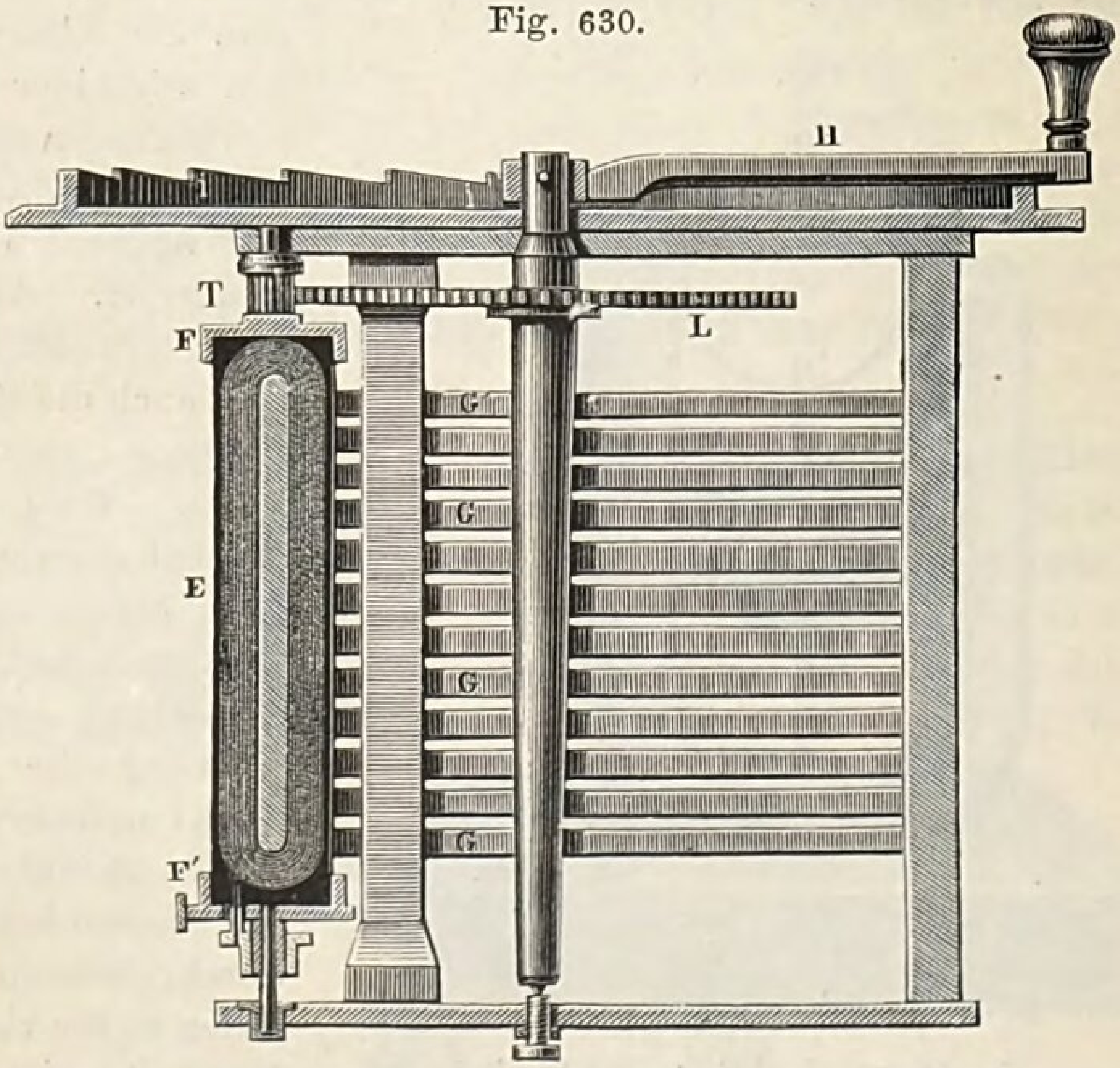


Die Anzahl der durch die Leiterfläche hindurchgehenden Kraftlinien würde viel grösser sein, wenn der Raum daselbst nicht mit Luft, sondern mit weichem Eisen erfüllt wäre. Dabei ist es in der Hauptsache gleichgültig, ob diese Eisenmasse innerhalb der vom Ring beschriebenen Rotationsfläche ruhig steht, oder ob sie mit rotirt. Nur insofern dabei das Eisen als Stromleiter auftreten und selbst Inductionsströme erhalten kann, welche man vermeiden will, macht es einen Unterschied, wovon später noch die Rede sein wird.

Wir werden so zur Construction eines Apparates geführt, welcher mit dem elektromagnetischen Motor von Ritchie, S. 650, Fig. 540, identisch ist. Die Identität würde an der dortigen Figur noch mehr hervortreten, wenn man, wie sonst üblich, den rotirenden Magnet nicht über, sondern zwischen den Polen des feststehenden anbrächte. Auf demselben Principe beruht der sehr wirksame Cylinderinductor von

Siemens (auch Doppel-T-Inductor genannt). Die Fig. 630 bis 632 stellen denselben dar. An einer vertical stehenden Eisenplatte sind zwei Reihen horizontaler Magnetstäbe $G\,G'$ befestigt, welche an ihrem vorderen freien Ende an der nach innen gekehrten Seite bei m cylindrisch ausgedreht sind, wie man dies am deutlichsten im horizontalen Durchschnitt, Fig. 631, sieht. In der hierdurch gebildeten cylindrischen Höhlung dreht sich der Cylinder E, welcher auf folgende Weise construirt ist. Zwei eiserne Cylinderabschnitte ff' sind durch eine eiserne Platte g verbunden, wie man Fig. 631 sieht. Diese verbindende Platte hat aber nicht ganz die Höhe der seitlichen Stücke f, so dass das Ganze eine Art Galvanometerrahmen bildet, welcher mit übersponnenem Kupferdraht so weit voll-

Fig. 630.



gewickelt wird, dass das Ganze einen Cylinder bildet, welcher, mit einer schützenden Hülle umgeben, oben und unten mit den Metallfassungen F und F' versehen wird. Die Umdrehung des Cylinders E um seine verticale Axe wird vermittelst der Kurbel H, des Zahnrades L und des Triebes T bewirkt.

Die Zähne i, welche eine unter der Kurbel H angebrachte Scheibe J umgeben, dienen dazu, bei der Fortschiebung der Kurbel um je einen Zahn den Cylinder E um je eine halbe Umdrehung vorwärts drehen zu können, so dass man den dadurch erzeugten einmaligen Inductionsstoss erhalten kann.

H. Wilde in Manchester hat 1866 den Siemens'schen Inductor zur Construction einer sehr grossen magneto-elektrischen Maschine be-

nutzt. Dieselbe enthielt zwei Inductoren. Der kleinere zwischen den Polen von Stahlmagneten rotirende lieferte den Strom für einen grossen Elektromagnet, zwischen dessen Polen dann der zweite grössere Inductor rotirte. Der Strom des letzteren stand dann zu anderweitigen Zwekken zur Verfügung. Die Inductoren wurden durch eine dreipferdige Dampfmaschine getrieben. Wilde ging sogar noch weiter, indem er mittelst dieses Stromes einen noch kräftigeren Elektromagnet erzeugte, zwischen

Fig. 631.

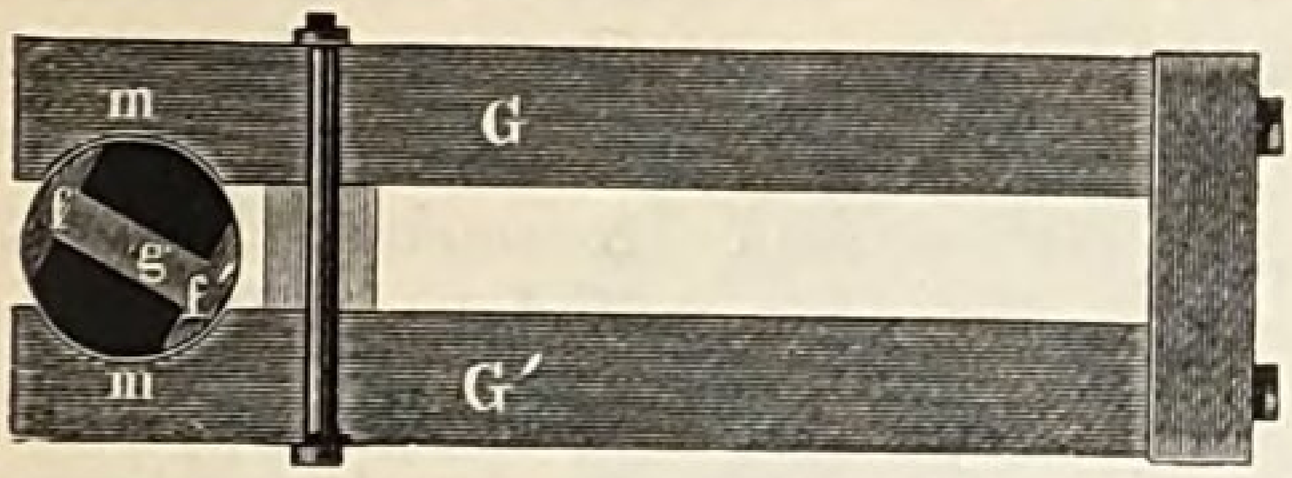
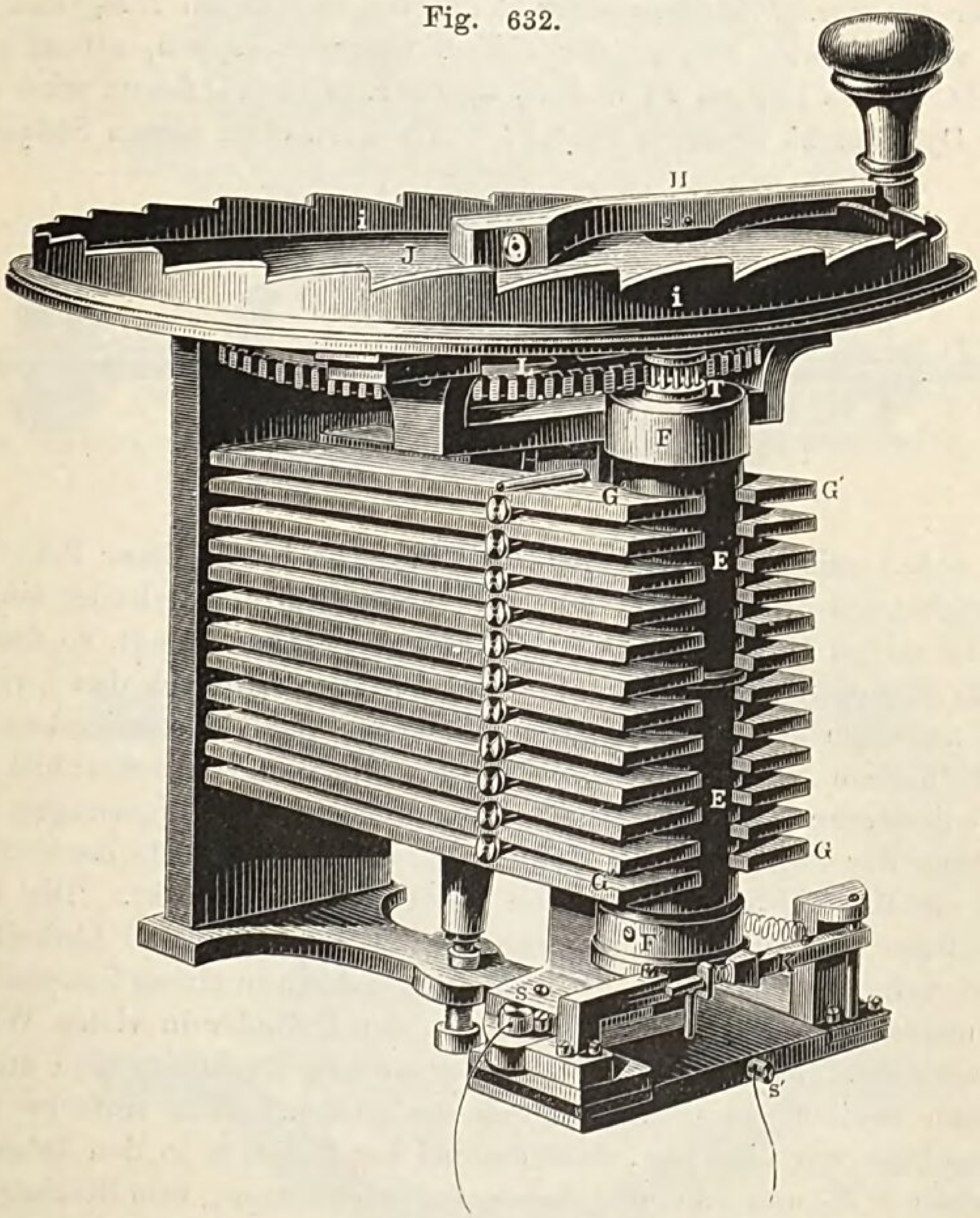


Fig. 632.

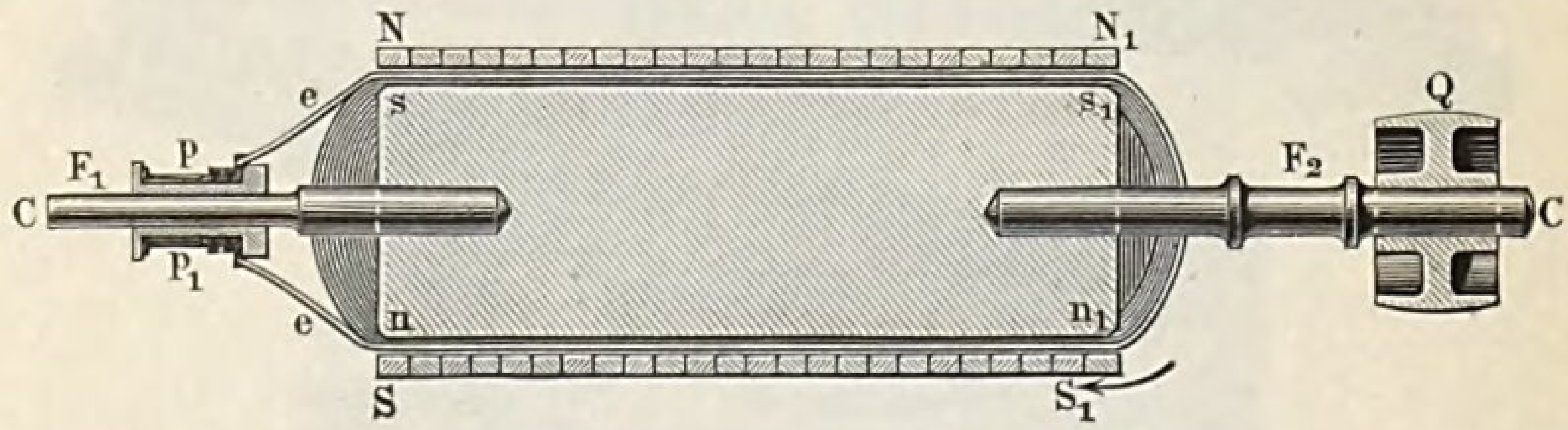


dessen Polen ein dritter noch grösserer Inductor mittelst einer Dampfmaschine von 15 Pferdekräften gedreht wurde. Er erhielt so einen Strom von solcher Stärke, durch den es beispielsweise gelungen sein soll, einen Platinstab von 6 mm Dicke und 60 cm Länge zu schmelzen.

Der beschriebene Cylinderinductor hat den Nachtheil, dass er mit Hülfe seines Commutators wohl gleichgerichtete, aber doch intermittirende Inductionsströme liefert. Soll der Strom ein continuirlicher werden, so müssen die Windungen des Leiters um die Axe herum symmetrisch gewickelt sein, so dass in jedem Momente einer Umdrehung eine gleiche Anzahl von Kraftlinien geschnitten werden. Diese Verbesserung führt uns zur Construction der magnetoelektrischen Trommelmaschine von v. Hefner-Alteneck, welche von Siemens und Halske in Berlin gebaut wird. Allerdings ist dieser Erfindung die der Pacinotti-Gramme'schen Maschine vorausgegangen, die wir aber, um den theoretischen Zusammenhang nicht zu unterbrechen, später beschreiben wollen.

Die Fig. 633 stellt eine v. Hefner-Alteneck'sche Trommel einfachster Art vor. Zwischen einer Reihe von Nordpolen NN_1 und einer Reihe von Südpolen SS_1 ist der eiserne Cylinder ss_1 nn_1 sammt seiner Axe CC in den Lagern F_1 und F_2 drehbar. Durch Influenz wird dabei dieser Cylinder zu einem Quermagnet, der nach oben seinen Südpol ss_1,

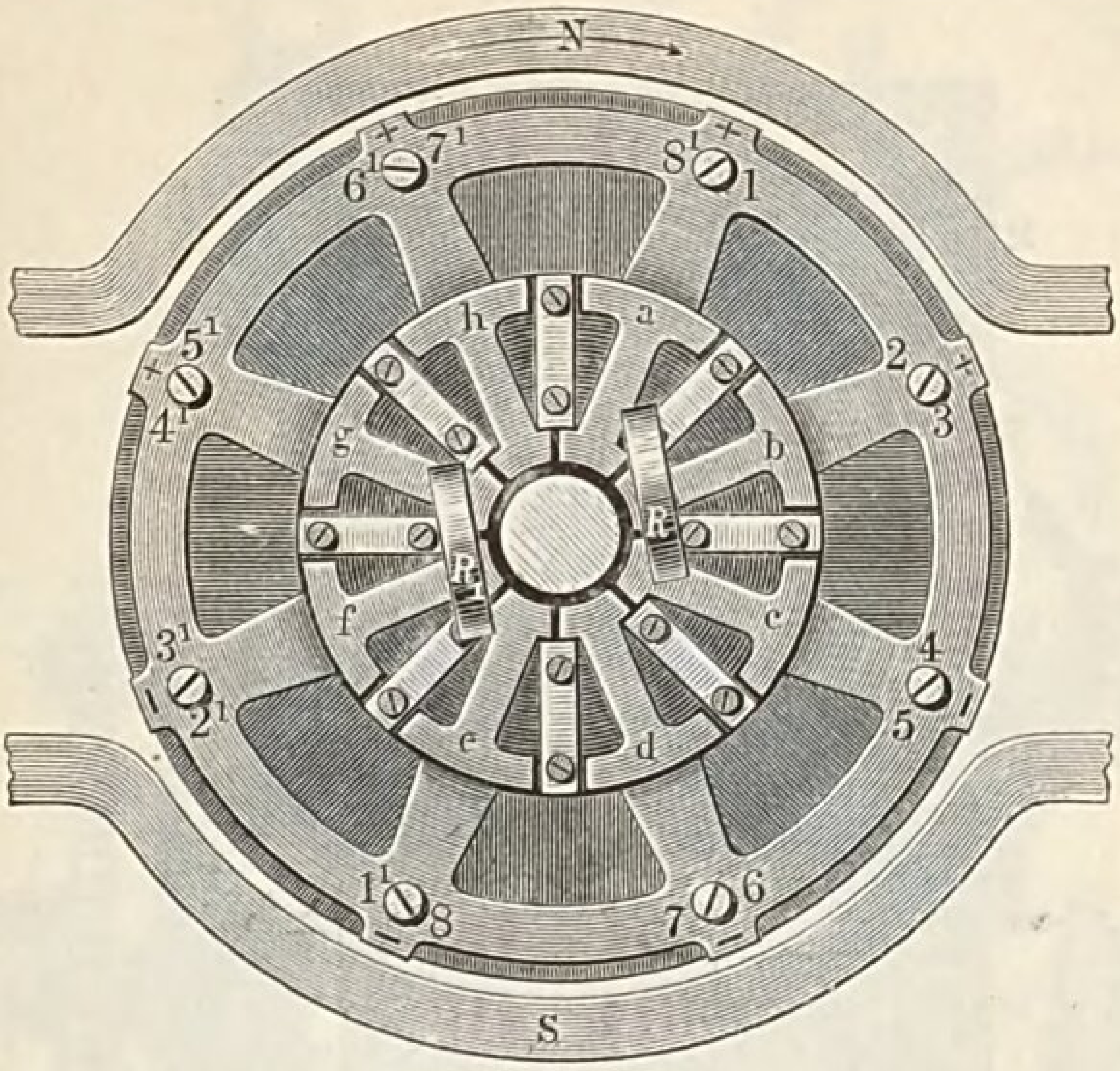
Fig. 633.



nach unten seinen Nordpol nn_1 erhält. Die Lage dieser Pole bleibt natürlich trotz der Rotation eine constante. Um den Cylinder sind nun parallel seinen Hauptschnitten die Drahtwindungen gelegt, so dass also bei der Rotation der grösste Theil der Drahtmasse durch den Zwischenraum zwischen den Reihen entgegengesetzter Pole hindurchgehen muss. Die Polflächen NN_1 und SS_1, welche hier im Verticaldurchschnitt durch die Cylinderaxe erscheinen, haben bogenförmige Verlängerungen in der Richtung der Peripherie des Cylinders, so zwar, dass jede der Polflächen etwa ein Drittel der Mantelfläche des Cylinders bedeckt. Die Drahtwindungen sind nun in mehreren (8 bis 28 und mehr) Abtheilungen derart aufgewickelt, dass jede Abtheilung nahezu in einem Hauptschnitte, also ungefähr in Form eines Rechtecks, den Cylinder in vielen Windungen umzieht. Die beiden Enden jeder solchen Drahtlage sind mit zwei isolirten Theilen eines Commutators verbunden. Eine einfache Ueberlegung lässt uns einsehen, dass der bei der Rotation in den Drahtlagen zwischen NN_1 und ss_1 entstehende Inductionsstrom, vom Beschauer aus gesehen, die entgegengesetzte Richtung haben muss mit jenem Inductionsstrom, der gleichzeitig in den Drahtlagen zwischen SS_1 und nn_1 entsteht. Eben deshalb müssen sich aber diese beiden Inductionsströme längs der ganzen Drahtleitung einer Abtheilung im selben Sinne addiren.

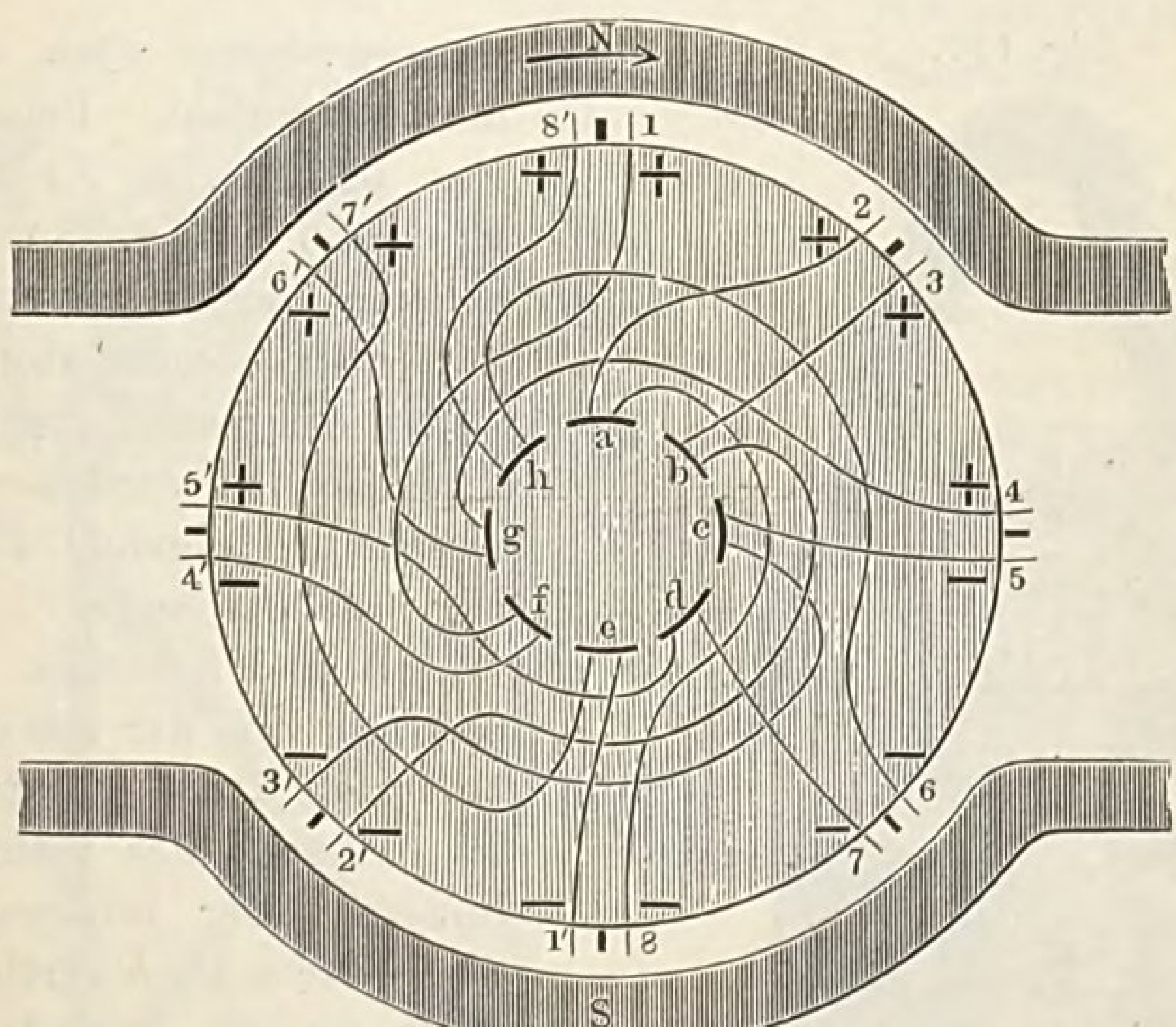
Dagegen wechselt dieser Strom im Ganzen seine Richtung zweimal bei jeder ganzen Umdrehung.

Fig. 634.



Solcher Drahtabtheilungen sind nun aber, wie erwähnt, in mehrfacher Anzahl, wir wollen annehmen, in der Zahl acht, vorhanden. Jede

Fig. 635.



der folgenden Abtheilungen ist in einer Ebene auf den Cylinder gewickelt, welche mit der Ebene der Nachbarwindungen einen Winkel von $\frac{1}{8}$ Kreis einschliesst. Da immer mehrere dieser Drahtabtheilungen gleich-

zeitig zwischen die Polflächen gelangen, so entstehen in mehreren derselben gleichzeitig Inductionsströme, wenn auch von ungleicher Stärke, welche sämmtlich gesammelt und in gleiche Richtung gebracht werden

Fig. 636.

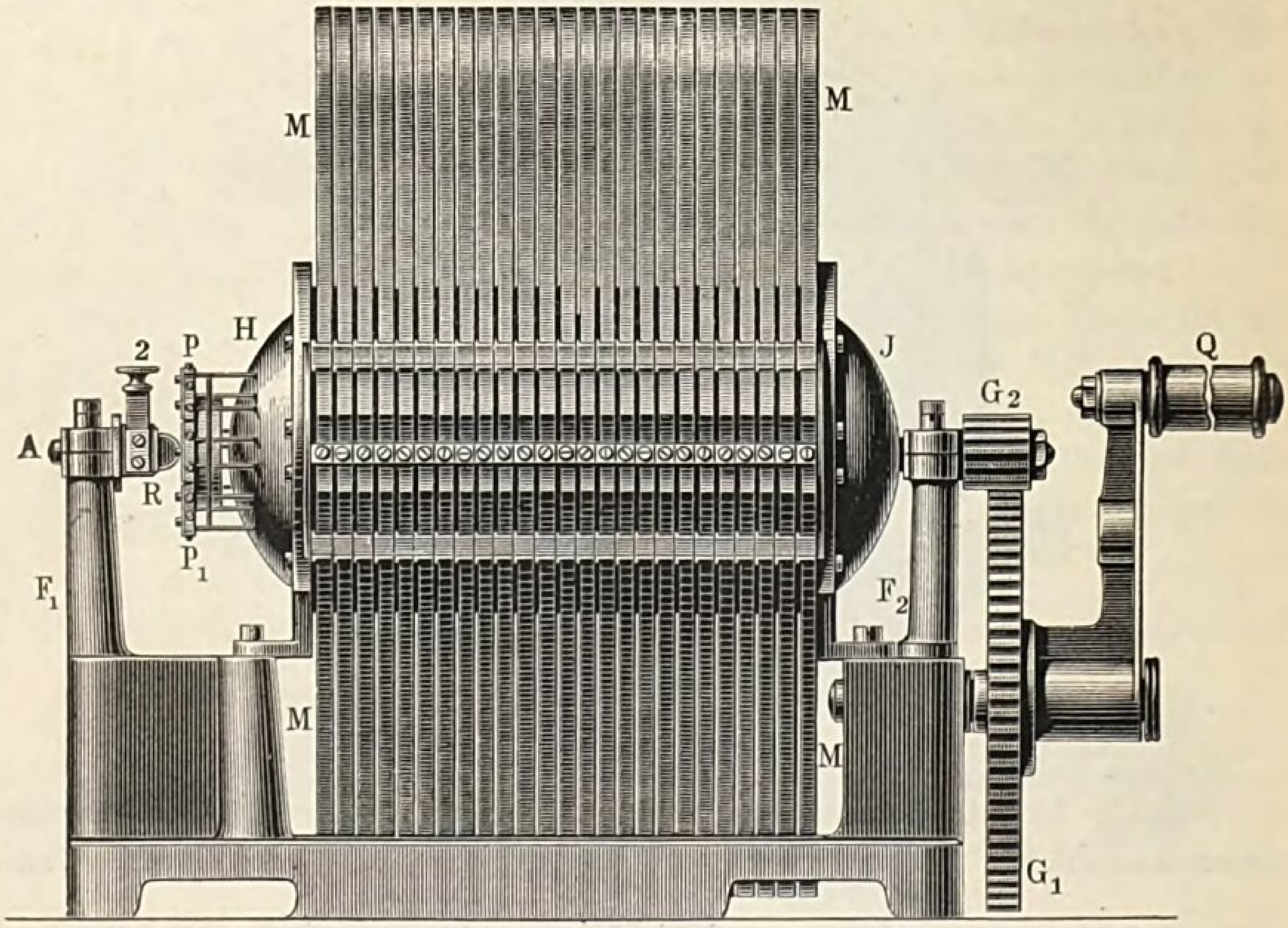
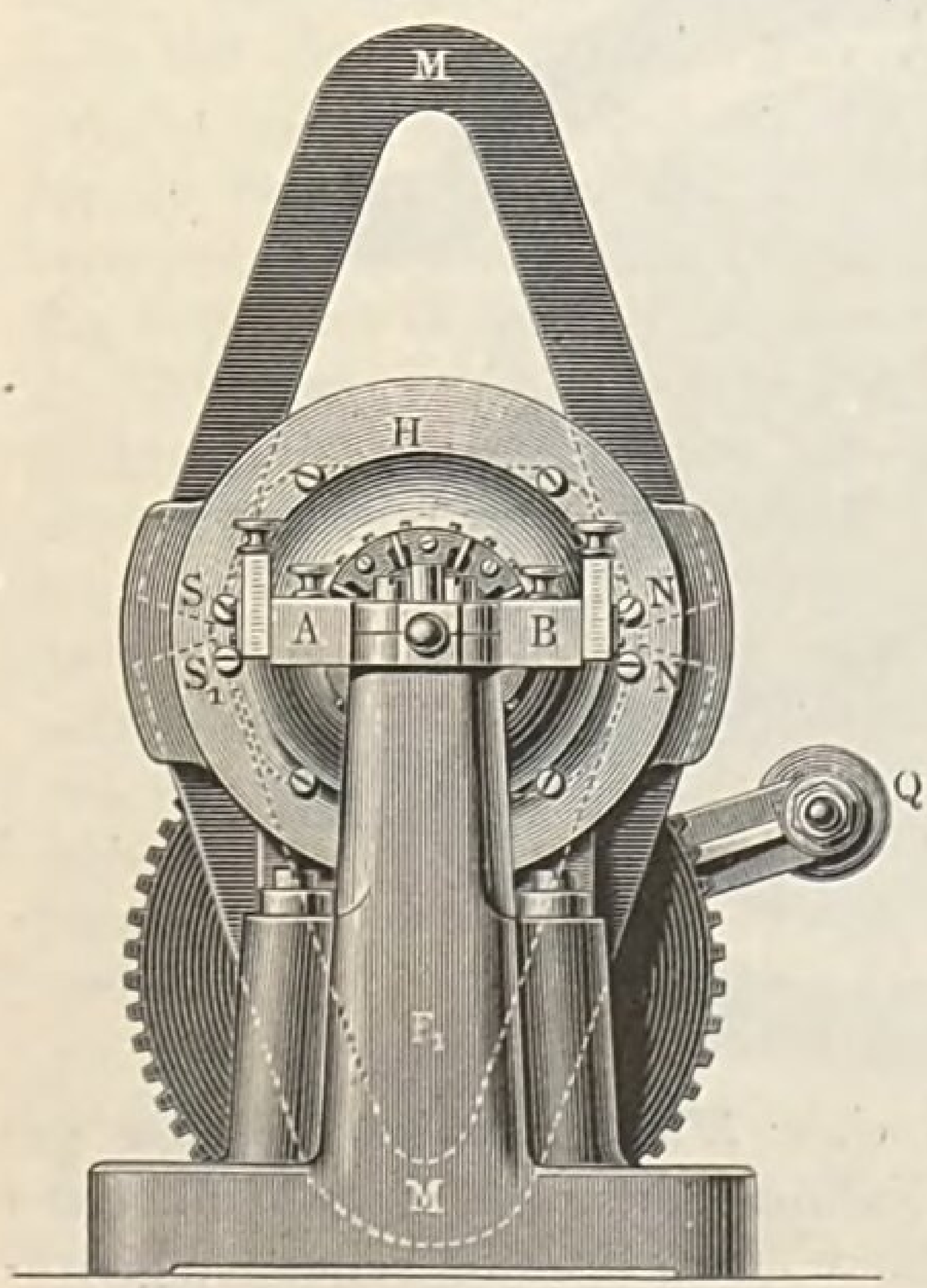


Fig. 637.



müssen, wozu eben der Commutator dient. Derselbe ist in Fig. 634 (a. v. S.) abgebildet. Fig. 635 (a. v. S.) giebt ein Schema der Drahtverbindungen mit dem Commutator, welches etwas complicirt aussieht, aber doch leicht zu verstehen ist. Man fasse nur folgende Punkte der Fig. 635 ins Auge.

N und *S* stellen die äusseren Pole vor; der mit den Ziffern besetzte Kreis entspricht der Mantelfläche des rotirenden Cylinders. Der innerste in acht Segmente *a* bis *h* zertheilte Kreis stellt die von einander isolirten metallischen Theile des Commutators vor. Von diesen Theilen sind stets diejenigen, welche die Lage *g* und *c* inne haben, mit den Con-

tactrollen oder mit Contactbürsten in Verbindung, welche den resultirenden Hauptstrom aufnehmen und abführen. Es handelt sich also darum,

Fig. 638.

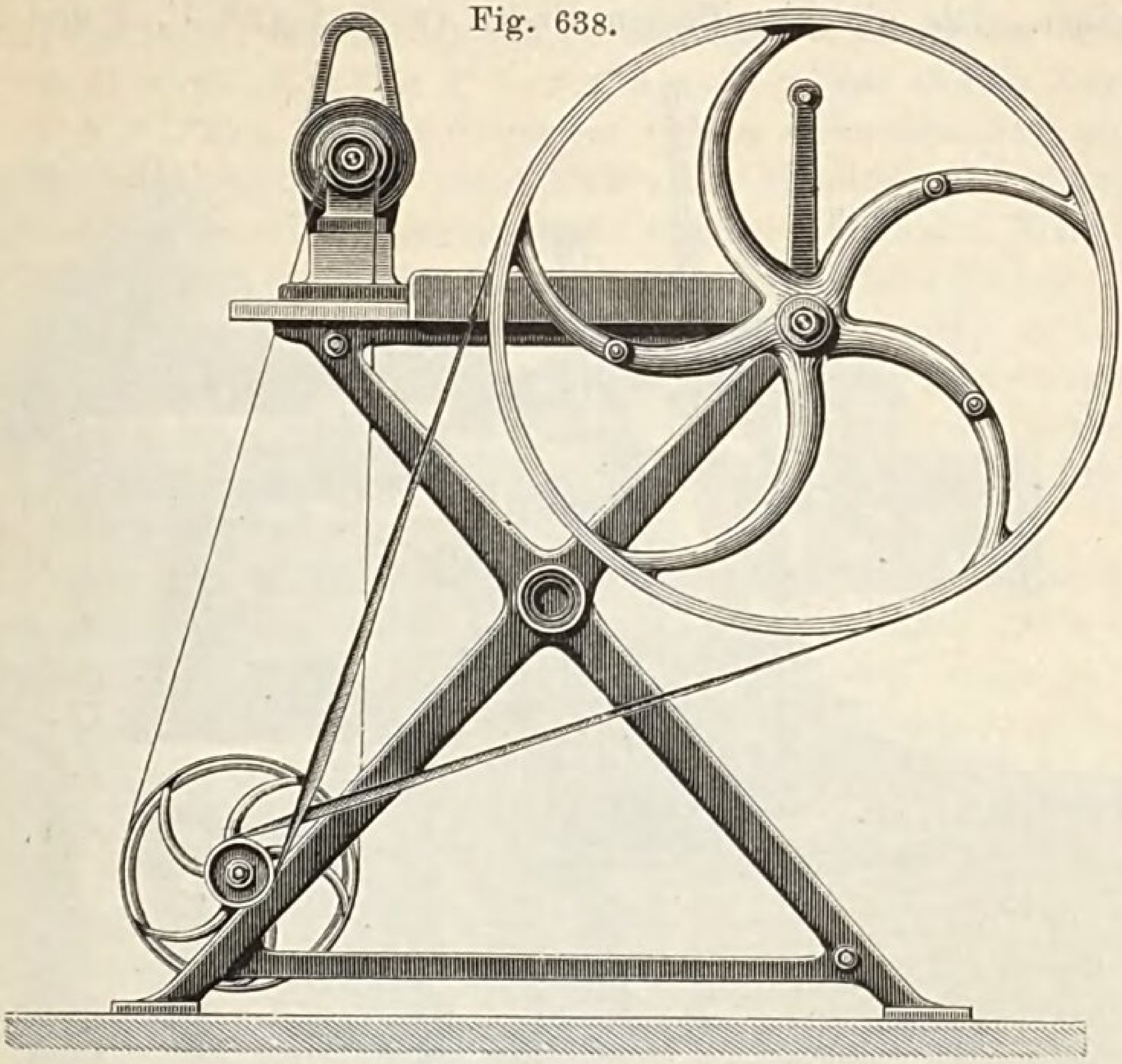
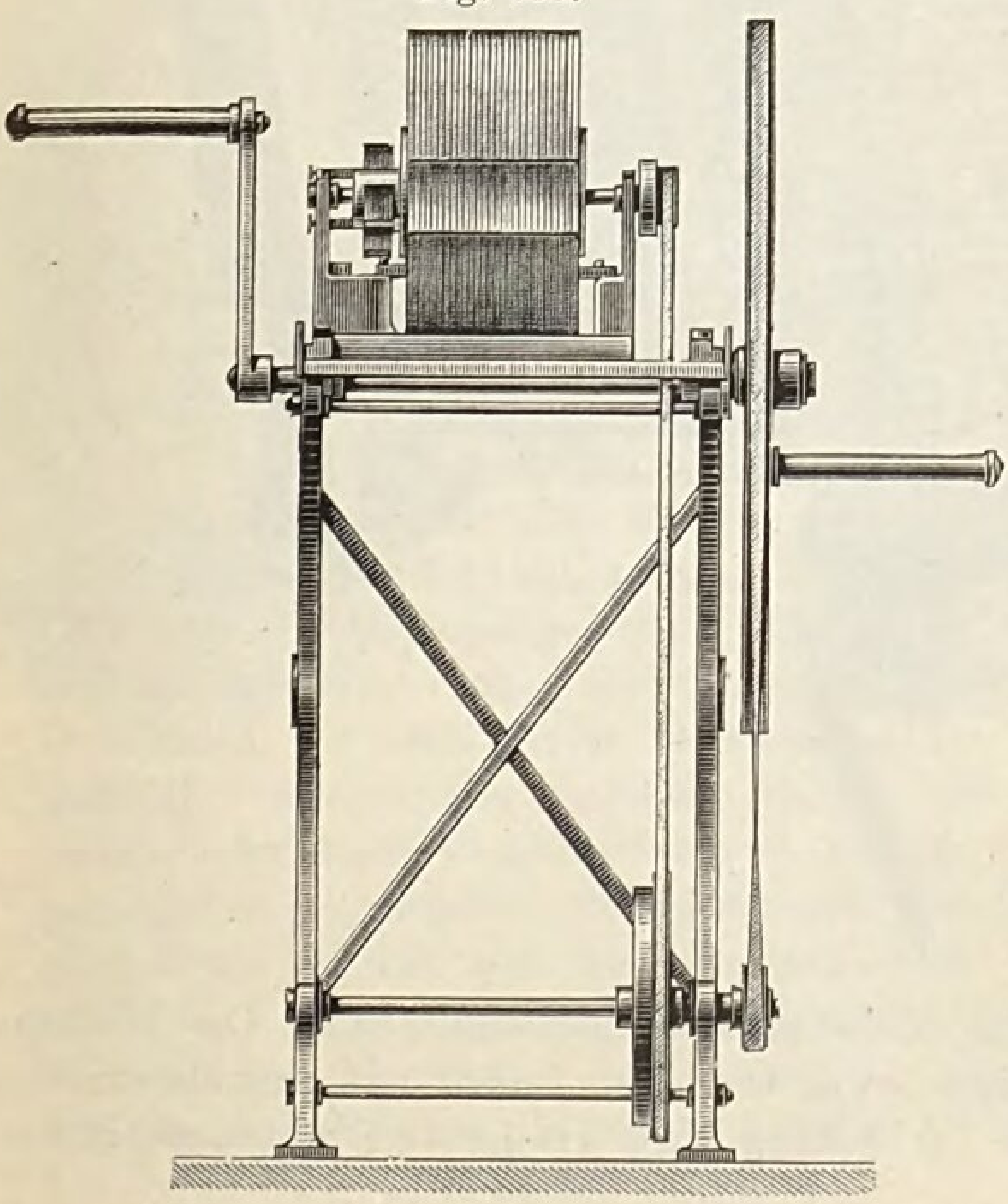


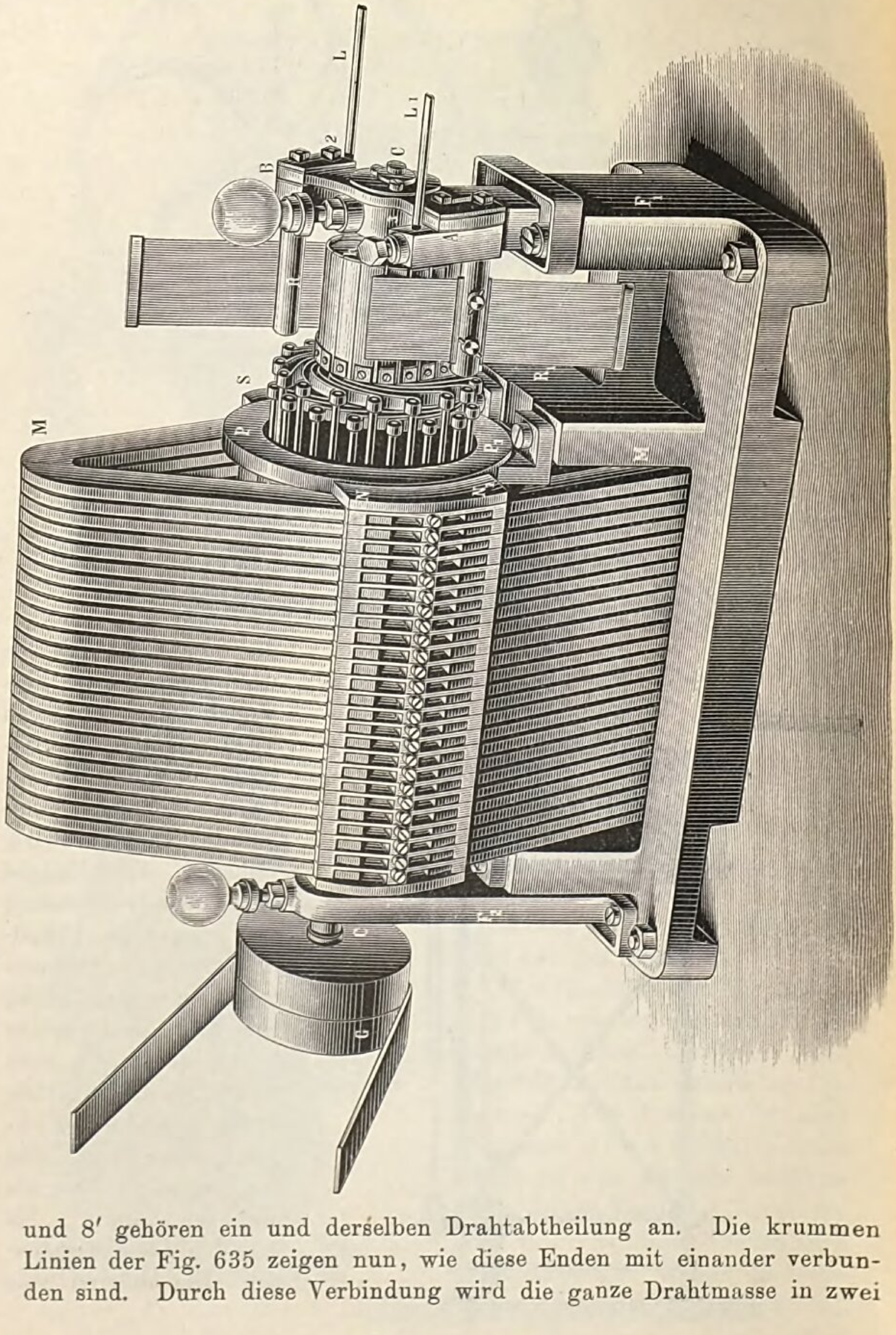
Fig. 639.



die sämmtlichen Drahtwindungen so zu verbinden, dass schliesslich jeder positive Einzelstrom der in *g* befindlichen Stelle des Commutators zugeführt wird, während das Endziel aller negativen Ströme die gegenüber befindliche Stelle des Commutators in *c* sein muss. Die acht Drahtpartien haben zusammen acht Enden, wo der positive Strom aus ihnen austritt, diese Enden sind mit einem + Zeichen und den Ziffern 1 bis 4 und 5′ bis 8′ bezeichnet. Die anderen acht

Enden, wo der negative Strom aus-, also der positive Strom eintritt, sind mit einem —Zeichen und den Ziffern 1′ bis 4′ und 5 bis 8 bezeichnet. Die gleichbezifferten Enden, z. B. 1 und 1′, 2 und 2′ . . . 8

Fig. 640.



und 8′ gehören ein und derselben Drahtabtheilung an. Die krummen Linien der Fig. 635 zeigen nun, wie diese Enden mit einander verbunden sind. Durch diese Verbindung wird die ganze Drahtmasse in zwei

Zweige geschieden, so zwar, dass jeder dieser Zweige für sich eine continuirliche Leitung bildet, die von c ausgeht und an g endet.

Z. B. geht bei der in Fig. 635 gezeichneten Stellung der eine Zweig von c aus über 5 5′, d 7 7′, e 1′ 1, f 4′ 4 nach g, der andere Zweig von c über 3′ 3, b 2′2, a 8 8′, h 6 6′ nach g. Man sieht also, dass auf diese Weise die vier Ströme der einen Hälfte der Windungsabtheilungen sowie die vier Ströme der anderen Hälfte separat in gleicher Richtung gesammelt und dann die beiden Summen dem bei g befindlichen Commutatorstücke zugeführt werden. Dreht man die Trommel, so tritt zwar an die Stelle g ein anderes Commutatorstück, aber der Sachverhalt bleibt derselbe. Die bei g und c anliegenden Contactrollen oder schleifenden Metallbürsten nehmen also die sämmtlichen Inductionsströme als gleichgerichteten constanten Strom auf.

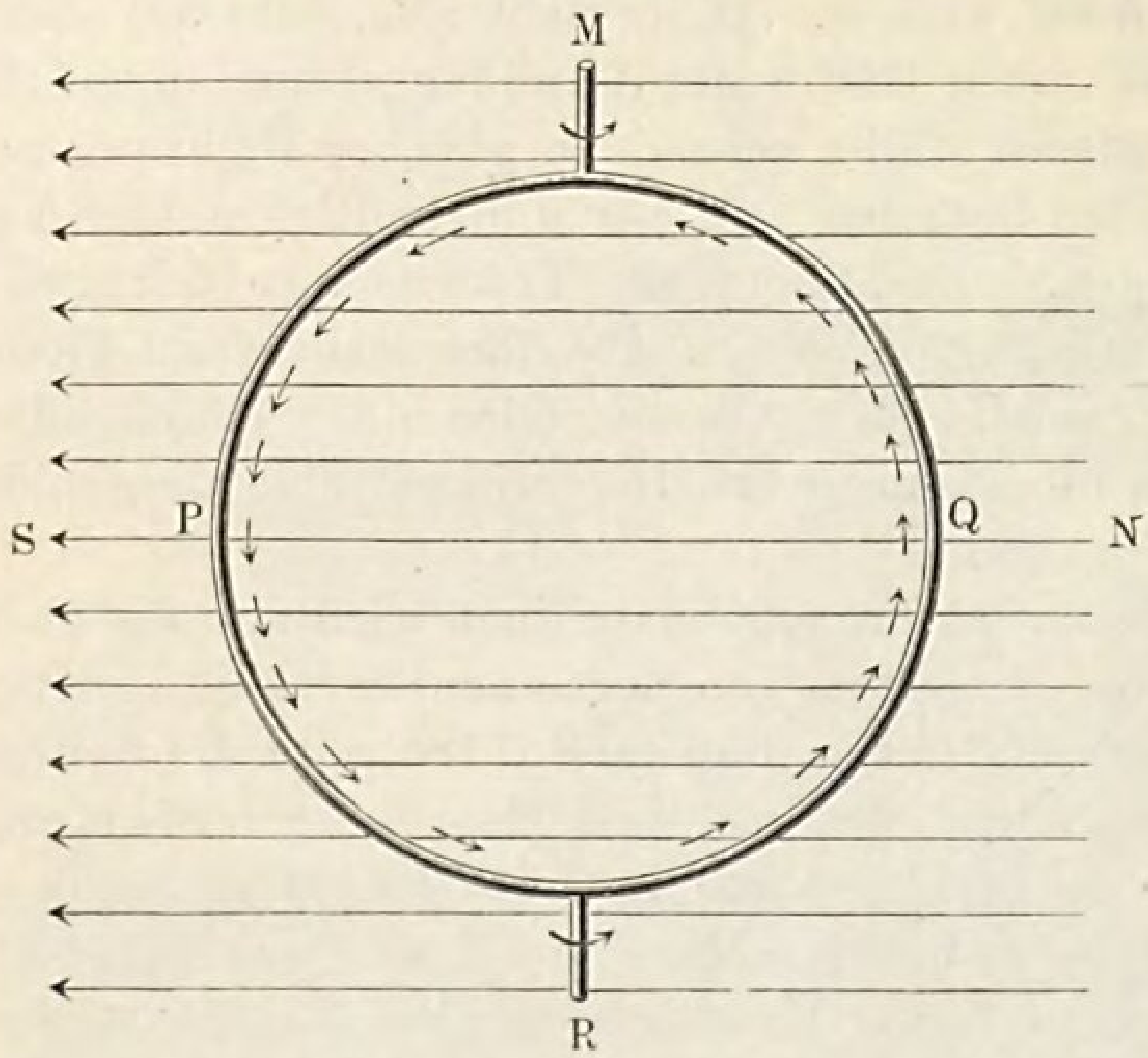
Bei den magneto-elektrischen Trommelmaschinen wird nun die eben beschriebene Trommel durch ein System von permanenten Stahlmagneten der Inductionswirkung ausgesetzt. Fig. 636 (a. S. 748) zeigt die Seitenansicht einer solchen für Handbetrieb eingerichteten Maschine von Siemens und Halske, bei welcher 50 Stahlmagnete in zwei Reihen angeordnet sind. Fig. 637 (a. S. 748) zeigt dieselbe Maschine in der Vorderansicht. Siemens und Halske liefern ferner Maschinen mit Riemenscheibe und Schwungrad zum Betriebe durch zwei Mann. Dieselben sind, wie Fig. 638 und 639 (a. S. 749) zeigen, auf einem Tisch mit Schwungrad und zwei Kurbeln montirt und durch zweimalige Uebersetzung auf grössere Umdrehungsgeschwindigkeit eingerichtet.

Die beschriebene Maschine liefert, mit einer Mannskraft betrieben, einen Strom von der elektromotorischen Kraft von acht Bunsen-Elementen, und hat nur 0,5 Siem.-Einh. inneren Widerstand; sie eignet sich daher für physikalische Laboratorien als Ersatz einer galvanischen Batterie für die Mehrzahl der Experimente. Von zwei bis vier Mann betrieben, reicht sie hin, um elektrisches Bogenlicht zu erzeugen. Fig. 640 endlich zeigt eine derartige Maschine für den Grossbetrieb in perspectivischer Abbildung.

Magnetoinduction durch das homogene Feld des Erdmagnetismus; Erdinductor; Inclinationsbestimmung. 202 Denkt man sich die entgegengesetzten Magnetpole, zwischen denen ein geschlossener Leiter rotirt, allmälig immer weiter von einander entfernt, so werden die den Leiter durchsetzenden Kraftlinien immer näher parallel. Auch durch künstliche Mittel, wie z. B. durch passende Polschuhe oder durch Combination von mehreren Magneten, lässt sich ein homogenes magnetisches Feld mehr oder weniger genau herstellen. Am einfachsten benutzt man das homogene Feld des Erdmagnetismus. Es stelle in Fig. 641 (a. f. S.) das parallele Liniensystem die Kraftlinien eines solchen homogenen Feldes vor, in welchem ein kreisförmiger geschlossener Leiter um die zu den Kraftlinien senkrechte Axe MR rotire.

Fig. 642 stelle denselben Leiter im Grundriss vor, wo er als Gerade PQ erscheint. Im Momente, wo die Ringebene parallel zu den Kraftlinien, also wie PQ steht, geht keine der letzteren durch die Leiterebene. Drehen wir darauf um 90⁰ nach rechts in die Lage $P'Q'$, Fig. 642, so gehen so viele Kraftlinien hindurch, als die Leiterfläche im Maximum zu fassen vermag. Ist deren Flächeninhalt $= F$, die Intensität des magnetischen Feldes $= T$, und die Frequenz der Kraftlinien so angenommen, dass auf die Flächeneinheit (1 qcm) T Kraftlinien treffen, so ist $F.T$ die Anzahl der Kraftlinien, welche bei jeder Vierteldrehung aus der parallelen zur senkrechten Stellung oder umgekehrt ein- oder austreten, also vom Leiter geschnitten werden *).

Fig. 641.



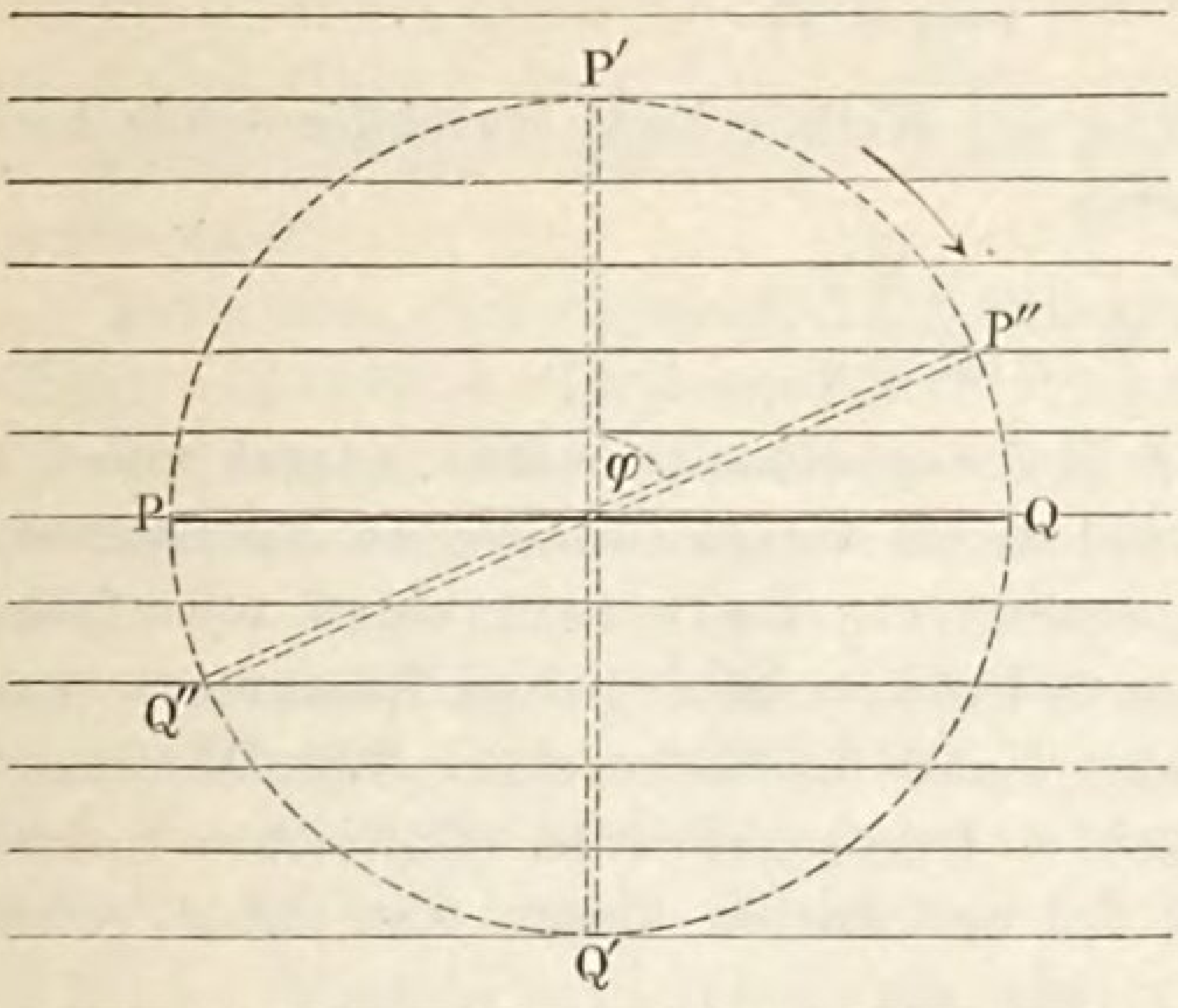
Drehen wir aus der Stellung $P'Q'$ nach rechts um volle 180⁰, so wird dieselbe Anzahl Kraftlinien zweimal geschnitten.

Innerhalb dieser ganzen Halbdrehung ist jedoch die bei constanter Drehungsgeschwindigkeit in gleichen Zeiträumen geschnittene Anzahl von Kraftlinien sehr verschieden gross, sie ist ein Minimum in der neutralen Stellung $P'Q'$, ein Maximum in der Stellung PQ und ändert sich, wie leicht zu übersehen ist, wie der Sinus des Winkels φ, welchen die jeweilige Stellung mit der neutralen Stellung einschliesst. Die momentane Grösse der elektromotorischen Kraft ist daher auch diesem

*) Im §. 29 haben wir uns vorgestellt, dass von einem Pole vom Magnetismus m auch m Kraftlinien ausgehen. In diesem Falle ist im Abstande R die Intensität des magnetischen Feldes (die Kraftwirkung auf einen Pol von der Stärke 1) $= \frac{m}{R^2}$, die Oberfläche ist $= 4R^2\pi$, also die Anzahl der Kraftlinien auf die Flächeneinheit $= \frac{m}{4R^2\pi}$. Die Intensität ist also in diesem Falle stets 4π mal so gross als die Anzahl der die Flächeneinheit durchsetzenden Kraftlinien. Nimmt man dagegen an, dass von einem Pol von der Stärke m $4\pi m$ Kraftlinien ausgehen, so ist die Intensität des Feldes stets durch die Zahl der die Einheit der Fläche senkrecht durchsetzenden Kraftlinien gegeben. Wir haben diese letztere Annahme im §. 29 deshalb nicht gemacht, weil wir nur eine ganze Zahl von Kraftlinien wirklich zeichnen, eine irrationale Anzahl also nicht darstellen konnten.

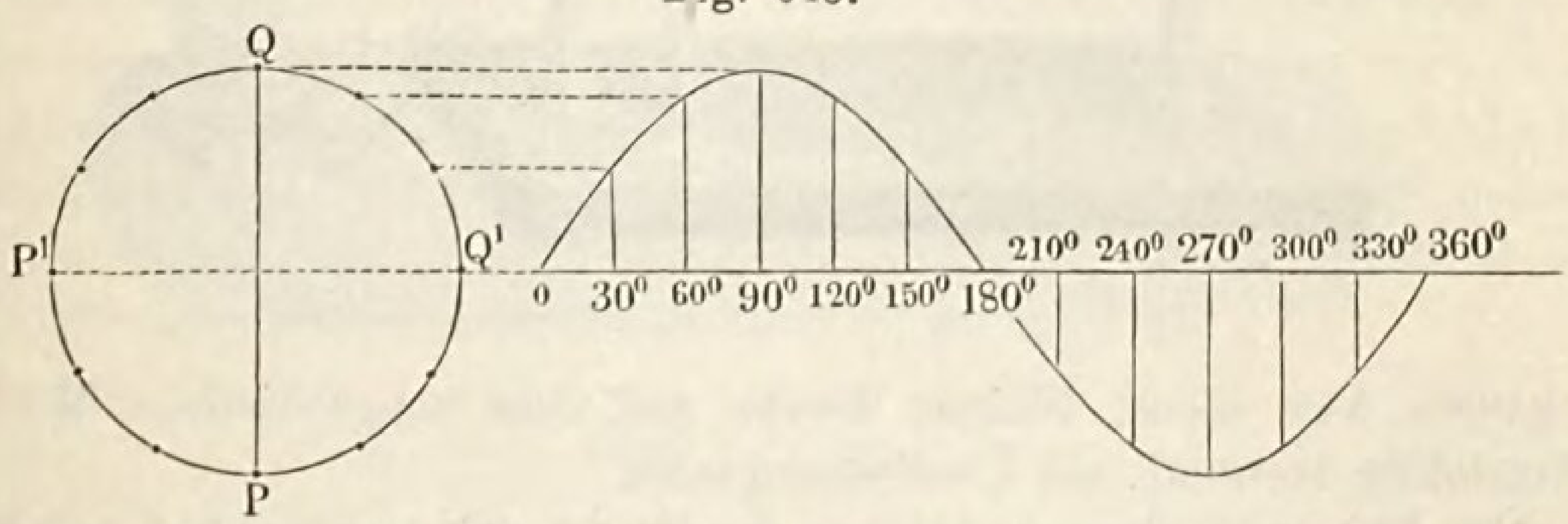
Sinus proportional. Demnach lässt sich die Aenderung dieser elektromotorischen Kraft durch die Construction einer Sinuscurve, Fig. 643, graphisch darstellen. Die Ordinaten der Curven geben die momentane elektromotorische Kraft für die Winkel φ an, welche als Abscisse aufgetragen sind. Das Curvenstück von 0 bis 90° entspricht der ersten Vierteldrehung, das von 90 bis 180° der zweiten Vierteldrehung, das von 180 bis 360° der zweiten Hälfte der ganzen Umdrehung, während welcher die elektromotorische Kraft eine entgegengesetzte Richtung hat.

Fig. 642.



Bei constanter Winkelgeschwindigkeit und constantem Widerstande stellt demnach dieselbe Curve auch dar, wie sich die momentane Stromstärke mit der Zeit verändert. Der Flächenraum zwischen der Curve und der Abscissenaxe stellt die Summe aller Producte aus den Ordinaten mit den dazwischen liegenden Abscissenabschnitten dar, ist also proportional mit der Summe der Producte aus den einzelnen Stromstärken mit ihrer Zeitdauer, also auch proportional mit der in Bewegung gesetzten

Fig. 643.



Elektricitätsmenge. Nach F. E. Neumann wird die momentane Stromstärke auch Differentialstrom, die gesammte Elektricitätsbewegung während der Drehung Integralstrom genannt. Offenbar ist der Integralstrom für eine ganze Umdrehung = Null, für eine halbe Umdrehung ein Maximum.

Beträgt die Summe der Flächen aller Windungen des Ringes F, die Intensität des magnetischen Feldes T, und die Zeit zu einer halben Umdrehung τ, so ist die mittlere elektromotorische Kraft E gegeben durch

$$E = \frac{2\,F\,.\,T}{\tau}.$$

Hat ferner der Ring mit allen Windungen den Widerstand R, das Galvanometer sammt Zuleitung den Widerstand r, so wird in demselben die mittlere Stromstärke

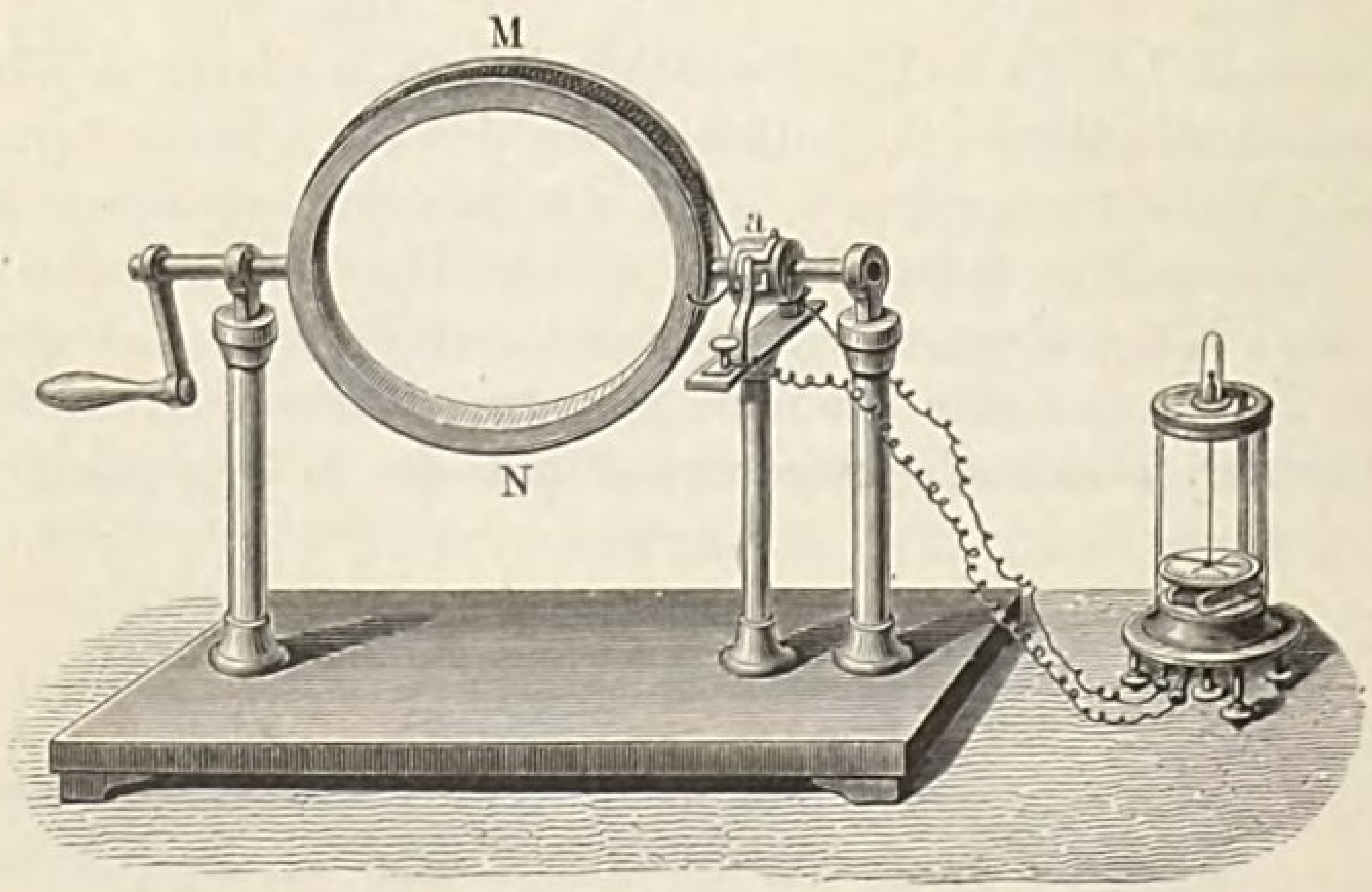
$$S = \frac{2\,F\,T}{\tau\,(R+r)}$$

herrschen, während die während der Halbdrehung durchfliessende Elektricitätsmenge gegeben ist durch

$$Q = \frac{2\,F\,T}{R+r}.$$

Die Induction durch den Erdmagnetismus wurde zuerst von Faraday beobachtet und zunächst durch einige italienische Naturforscher weiter verfolgt und endlich construirte Palmieri einen tellurischen Inductionsapparat, mit welchem er Funken, Schläge und Wasserzersetzung ohne Vermittelung von weichem Eisen hervorbrachte: 200 Windungen eines 1,5 mm dicken Kupferdrahtes waren auf einen elliptischen Rahmen gewickelt, dessen grosse Axe 2,2 und dessen kleine Axe 0,6 m betrug.

Fig. 644.



Die grosse Axe dieser Ellipse diente, auf dem magnetischen Meridian rechtwinklig stehend, als Umdrehungsaxe.

Fig. 644 stellt einen derartigen Erdinductionsapparat mit kreisförmigen Windungen dar. Es seien zunächst die Enden der Drahtwindungen direct (d. h. ohne Vermittelung des Commutators a, welcher zu diesem Zweck entfernt sein muss) mit einem etwas entfernt stehenden Multiplicator verbunden, und der Rahmen MN so gestellt, dass seine Ebene rechtwinklig steht auf der Richtung der Inclinationsnadel, so wird, wenn man die Axe rasch um 180° dreht, ein Strom in den Windungen inducirt, welcher die Multiplicatornadel nach einer, etwa nach der rechten Seite hin, ablenkt. Dreht man alsdann, wenn die Nadel, auf dem Rückwege begriffen, eben die Gleichgewichtslage passirt, die Windungen rasch in ihre ursprüngliche Lage zurück, so erfolgt eine Ablenkung der

Multiplicatornadel nach entgegengesetzter Seite, welche grösser ist als die erste, weil die Nadel schon in Bewegung war, als der Inductionsstrom auf sie wirkte.

Fährt man auf diese Weise fort, jedesmal die Windungen um 180° zu drehen, wenn die Nadel eben die Gleichgewichtslage passirt, so erreicht man nach einiger Zeit ein Maximum der Ablenkung, welches als ein Maass für die inducirende Kraft des Erdmagnetismus betrachtet werden kann.

Hätte man den Apparat so gestellt, dass die Umdrehungsaxe selbst mit der Richtung der Inclinationsnadel parallel ist, so würde man keinerlei Ablenkung am Multiplicator beobachtet haben.

Für den Fall, dass die Umdrehungsaxe der Inductionsspirale eine verticale Lage hat und man die Drehung um 180° jeweils von einer Lage aus vornimmt, bei welcher die Ebene der Windungen rechtwinklig auf dem magnetischen Meridiane steht, kann nur der horizontale Theil des Erdmagnetismus inducirend auf die Spirale wirken, die am Multiplicator beobachtete Ablenkung ist also in diesem Falle ein Maass für die horizontale Composante H des Erdmagnetismus.

Steht endlich die Umdrehungsaxe zwar horizontal, aber in der Ebene des magnetischen Meridians, beginnt man die Drehungen um 180° stets von einer solchen Stellung aus, bei welcher die Windungen in einer horizontalen Ebene liegen, so kann nur der verticale Theil des Erdmagnetismus inducirend wirken, die in diesem Falle am Multiplicator beobachtete Ablenkung ist also ein Maass für die verticale Composante V des Erdmagnetismus.

Darauf nun gründete Weber*) eine Methode zur Bestimmung der magnetischen Inclination durch Erdinduction, indem er die Stärke der Inductionsströme ermittelt, welche in einer grossen Inductionsspirale durch den Erdmagnetismus inducirt werden, wenn die Umdrehungsaxe sich in den beiden zuletzt besprochenen Positionen befindet. Bezeichnet man mit H die horizontale und mit V die verticale Composante der Intensität des Erdmagnetismus, so hat man

$$tang\ i = \frac{V}{H},$$

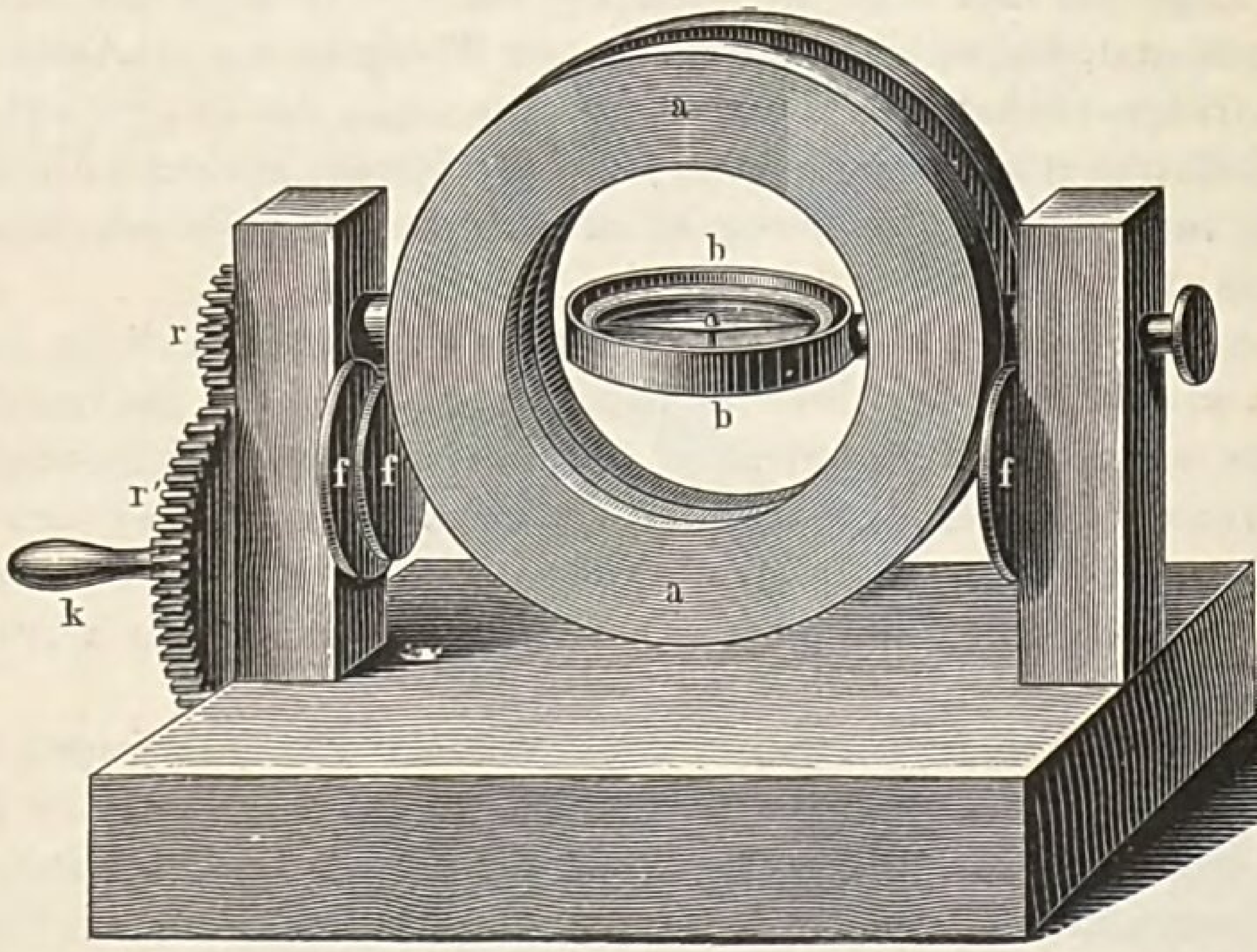
wenn man mit i die Inclination bezeichnet.

Die von Weber zu diesem Zwecke verwendete Inductionsspirale war aus einem 542 m langen ungefähr 20 kg schweren übersponnenen Kupferdraht verfertigt und bestand aus 605 Windungen, die in 18 Schichten über einander lagen. Der Umfang der innersten Schicht betrug 718, der Umfang der obersten Schicht aber betrug 1078 mm. Die Summe der von sämmtlichen Windungen umschlossenen Kreisflächen war 39 216 930 qmm.

*) Pogg. Ann. XC.

Will man mit den durch Erdmagnetismus inducirten Strömen bei continuirlicher Rotation der Axe experimentiren, so muss man die Drahtenden der rotirenden Spiralen mit einem auf der Rotationsaxe angebrachten Commutator in ähnlicher Weise verbinden, wie dies bei den magneto-elektrischen Rotationsmaschinen der Fall ist. Wenn der Commutator so gestellt ist, dass er gerade in dem Momente wechselt, in welchem ein Wechsel der Stromrichtung in der rotirenden Spirale stattfindet, so liefert der Commutator stets gleichgerichtete Ströme. An dem Apparat Fig. 644 ist ein solcher Commutator bei *a* angebracht. Durch Vermittelung desselben erhält man bei continuirlicher Rotation der Inductionsspirale an dem Multiplicator eine constante Ablenkung.

Fig. 645.



Weber hat auch noch auf eine zweite sehr sinnreiche Weise die tellurische Induction benutzt, um die magnetische Inclination zu bestimmen. Sein Inductions-Inclinatorium, Fig. 645, hat folgende Einrichtung. *aa* ist ein Ring, welcher 10 cm inneren und 16,1 cm äusseren Durchmesser hat; er besteht aus 16 ringförmig ausgeschnittenen Kupferblechen, von denen 8 auf der einen, 8 auf der anderen Seite sich befinden, während in der Mitte ein Zwischenraum von 12 mm bleibt. Die Dicke des ganzen Ringes mit Einschluss des Zwischenraumes betrug 34 mm. Die Axe, um welche dieser Ring gedreht ist, liegt auf beiden Seiten auf Frictionsrollen. Auf der rechten Seite ist die Axe hohl, und durch diese Höhlung ragt ein Stäbchen in den Ring hinein, welches die Bussole *b* trägt. Die Rotation des Ringes um seine Axe wird unter Vermittelung der Zahnräder *r* und *r'* durch die Kurbel *k* bewirkt. Sieben Umdrehungen der Kurbel entsprechen 40 Umdrehungen des Inductionsringes.

Das Instrument wird so aufgestellt, dass die Umdrehungsaxe des Inductionsringes in den magnetischen Meridian fällt.

Bei jedem Schlage eines Secundenzählers wurde die Kurbel $\frac{1}{2}$- oder 1 mal herumgedreht, was für den ersten Fall 166,7, für den zweiten 333,4 Umdrehungen des Inductors in der Minute ausmacht, da der Secundenschläger nicht genau Secunden schlug, sondern 60 Schläge = 61,7 Secunden waren.

Bei 166,7 Umdrehungen des Inductors in einer Minute wurde die Magnetnadel um 5,63^0, bei 333,4 Umdrehungen um 10,76^0 abgelenkt; die Ablenkung, also auch die Stärke des inducirten Stromes, ist mithin nahezu der Umdrehungsgeschwindigkeit proportional.

Da die Magnetnadel bei ihrer Ruhelage mit der Umdrehungsaxe des Ringes zusammenfällt, so kann sie im rotirenden Ringe keine Ströme induciren; ebensowenig inducirt der horizontale Theil des Erdmagnetismus im rotirenden Ringe einen Strom, die inducirten Ströme rühren also lediglich von der verticalen Componente des Erdmagnetismus her.

Während der Rotation des Ringes wirken auf die Nadel zwei Kräfte, eine ablenkende, welche von dem inducirten Strome herrührt, also dem verticalen Theile V des Erdmagnetismus proportional ist, und die wir also mit $bM.V$ bezeichnen können, wenn M die Stärke des Nadelmagnetismus und b ein constanter Factor ist. Der horizontale Theil des Erdmagnetismus zieht aber die Nadel mit der Kraft $M.H$ zurück, wenn H die horizontale Intensität des Erdmagnetismus bezeichnet; folglich ist die Tangente des Ablenkungswinkels v

$$tang\ v = \frac{b M V}{M H} = b \frac{V}{H} = b . tang\ i$$

oder

$$tang\ i = a\ tang\ v,$$

wenn $a = \frac{1}{b}$, denn der Quotient $\frac{V}{H}$ ist der Tangente der magnetischen Inclination i gleich. Man könnte also aus der beobachteten Ablenkung v der Nadel unseres Instrumentes die Inclination i berechnen, wenn nur der Factor a bekannt wäre.

Diesen Factor kann man aber umgekehrt für eine bestimmte Umdrehungsgeschwindigkeit bestimmen, wenn die Inclination des Ortes genau bekannt ist. Nach den oben angeführten Beobachtungen war für 166,7 Umdrehungen in der Minute die Ablenkung im Mittel 5,465^0, also $tang\ v = 0{,}0962$; für Göttingen, wo die Versuche mit dem Instrument angestellt wurden, war zur Zeit dieser Beobachtungen die Inclination 67^0 50$'$ also $tang\ i = 2{,}4545$, und

$$a = \frac{2{,}4545}{9{,}0962} = 25{,}514.$$

Für die erwähnte Umdrehungsgeschwindigkeit haben wir also

$$tang\ i = 25{,}514\ tang\ v.$$

Man kann also nun, wenn an irgend einem anderen Orte Versuche mit diesem Instrumente gemacht werden, aus dem beobachteten Ablenkungswinkel v die Inclination des Ortes bestimmen. Gesetzt, man habe mit demselben Instrumente an irgend einem Orte für die erwähnte Umdrehungsgeschwindigkeit $v = 3{,}5^0$ gefunden, so ergäbe sich für die Inclination dieses Ortes

$$tang\ i = 25{,}514 \,.\, 0{,}06116 = 1{,}5605$$
$$i = 57^0\,21'.$$

Der Factor von *tang v* ändert sich übrigens im umgekehrten Verhältniss der Umdrehungsgeschwindigkeit; für 500 Umdrehungen in der Minute (natürlich an demselben Instrument) wäre demnach der Factor von *tang v*

$$a = 25{,}514 \cdot \frac{166{,}7}{500}.$$

So ist man also vermöge dieser äussert sinnreichen Methode im Stande, aus der beobachteten Ablenkung einer horizontalen Magnetnadel die Inclination des Ortes zu bestimmen*).

203 **Ableitung der absoluten Widerstandseinheit mittelst des Erdinductors.** In den §§. 126 und 193 haben wir die Ableitung einer absoluten Einheit der elektromotorischen Kraft und der darauf beruhenden Einheit des Widerstandes besprochen. Wir können nunmehr zeigen, wie W. Weber mittelst des im vorausgegangenen Paragraphen beschriebenen Erdinductors diese theoretischen Einheiten experimentell verwirklichen konnte.

Weber wandte zu seinen Widerstandsbestimmungen einen Erdinductor an, dessen Windungen auf einen sechseckigen Rahmen, ungefähr von der in Fig. 646 dargestellten Form, aufgewickelt waren. Der Umfang der innersten Drahtlage betrug 3067, der der äussersten 3170 mm. Der übersponnene Kupferdraht, welcher sammt Wolle 16 533 g wog, bildete 145 Windungen in sieben Lagen. Die Summe der von den einzelnen Windungen umschlossenen Flächenräume war nach Weber's Bestimmung

$$\Sigma = 104\,924\,000\,\text{qmm}.$$

In Fig. 647 stelle nun der verkürzt gezeichnete Kreis A schematisch einen um seine verticale Axe drehbaren Erdinductor dar, dessen Windungen sich vorerst noch in der Ebene des magnetischen Meridians befinden und dessen Drahtenden a und b leitend mit den Drahtenden c und d eines Multiplicators verbunden sind, welcher in unserer Figur gleichfalls nur schematisch durch den verkürzt gezeichneten Kreis B dargestellt ist, und dessen Windungen ebenfalls in der Ebene des magnetischen Meridians liegen.

*) Poggend. Annal. Bd. XLIII, S. 493.

Für die in Rede stehenden Untersuchungen muss der Multiplicator gleichfalls von colossalen Dimensionen sein. Der Weber'sche bestand aus 1854 Windungen, welche 28 Lagen bildeten. Der Radius der innersten Lage betrug 303, der der äussersten betrug 374, der mittlere Radius r' 338 mm. Das Gesammtgewicht des zu diesem Multiplicator verwendeten Kupferdrahtes sammt Wolle betrug 157 kg.

In der Mitte dieser Windungen hing eine Messinghülse, in welcher ein 6 cm langer, 6,2 mm dicker Magnetstab steckte und welcher nach Art der Magnetometer mit einem Planspiegel von 30 mm Durchmesser versehen war. So oft nun durch eine Drehung des Inductors A um 90^0 ein Strom inducirt wurde, durchlief derselbe die Windungen des Inductors und die des Multiplicators, da aber letzterer hinlänglich weit von dem ersteren aufgestellt war, so konnte nur der Strom im Multiplicator B ablenkend auf die Magnetnadel m wirken, deren Ablenkung ein Maass für die Stromstärke abgiebt.

Fig. 646.

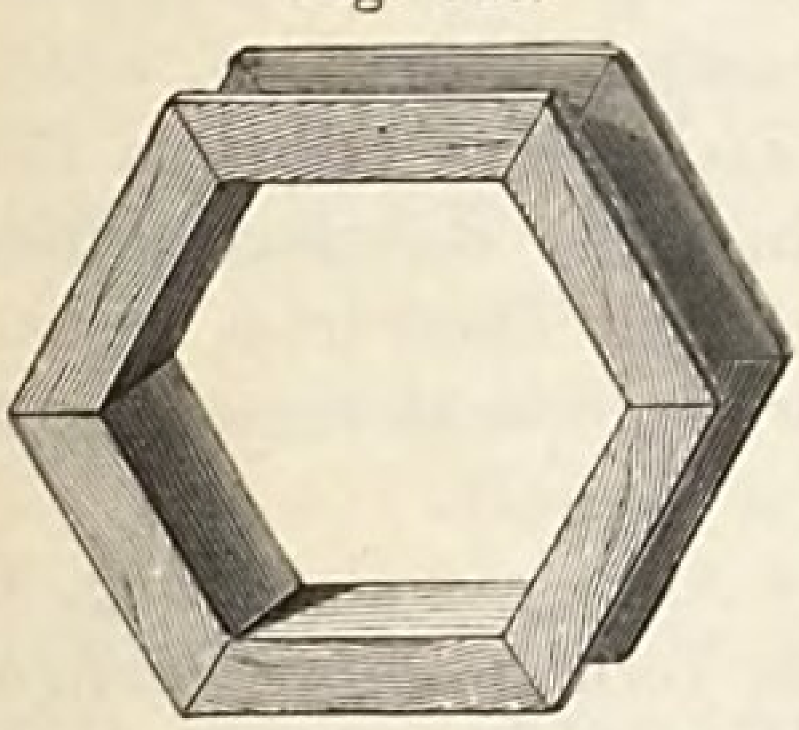
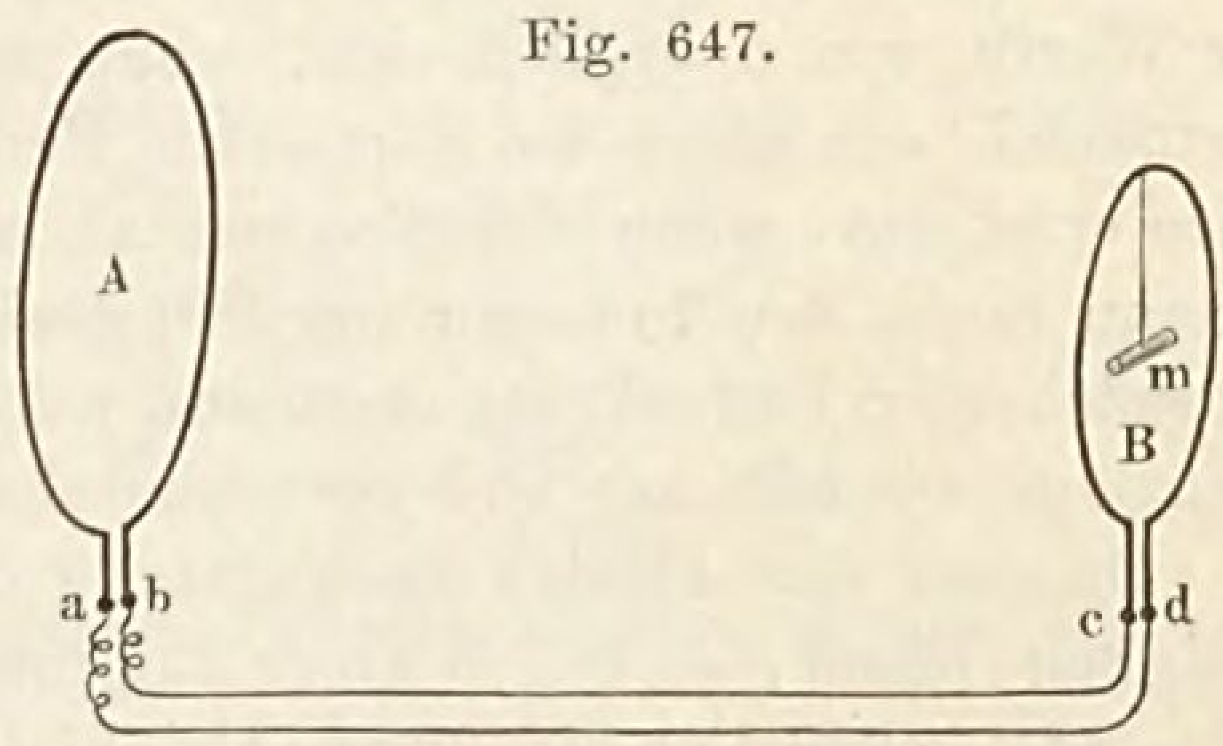


Fig. 647.



Hätte man es mit einem beständigen Strome zu thun, welcher der Nadel eine gleichbleibende Ablenkung u ertheilt, so könnte man aus derselben nach §. 121 die in absolutem Maasse ausgedrückte Stromstärke s berechnen. Nun haben wir es aber nicht mit einem gleichbleibenden Strome zu thun, sondern mit einem solchen, welcher nur während einer kurzen Zeit ∂ auf die Nadel wirkend ihr einen Impuls giebt, vermöge dessen sie um den Winkel v aus ihrer Gleichgewichtslage herausgeworfen wird, um dann nach derselben zurückzukehren und auf der anderen Seite nahe ebensoweit auszuschlagen (vorausgesetzt, dass den Schwingungen der Nadel keine Dämpfung entgegenwirkt). Aus diesem Ablenkungswinkel v ergiebt sich dann der Werth der Stromstärke

$$s = \frac{H \,.\, r' \,.\, t \,.\, tang\ v}{2\pi^2 \,.\, n \,.\, \partial}$$

wenn t die Schwingungsdauer des Magnetstabes, r' den mittleren Radius der Multiplicatorwindungen und n die Anzahl dieser Windungen bezeichnet. Die diesen Strom erregende elektromotorische Kraft ist gegeben durch die Gleichung:

$$E = \frac{\Sigma H}{\partial},$$

folglich erhalten wir für den Widerstand w des gesammten Stromkreises:

$$w = \frac{E}{s} = \frac{2\pi^2 . \Sigma . n}{r' . t . tang\, v} \quad \text{. 1)}$$

Da $w = 1$ wird, wenn $E = 1$ und $s = 1$, so ist die Einheit des nach absolutem Maass gemessenen Leitungswiderstandes derjenige Widerstand, welchen der gesammte Schliessungsbogen leisten müsste, wenn die Einheit der nach absolutem Maass gemessenen elektromotorischen Kraft die nach absolutem Maass gemessene Stromstärke 1 hervorbringen sollte.

Bei der fraglichen Versuchsreihe Weber's war, wie wir bereits gesehen haben,

$$\Sigma = 104\,924\,000 \text{ und } n = 1854.$$

Ferner haben wir zu setzen

$$r' = 338 \text{ und } t = 10{,}282.$$

Es bleibt uns nur noch übrig, die Bestimmung von v zu besprechen. Der Werth von v ergiebt sich, wenn man zuerst beobachtet, welcher Theilstrich der Scala am verticalen Faden des Fadenkreuzes im Fernrohre erscheint, wenn der Magnetstab sich in seiner Ruhelage befindet, alsdann rasch den Inductor um 90⁰ dreht und den Theilstrich beobachtet, welcher am Fadenkreuz erscheint, wenn der Magnetstab seine äusserste Grenzlage erreicht hat und zurückzuschwingen beginnt.

Da aber eine einzige Beobachtung dieser Art nicht die nöthige Genauigkeit bietet, so hat Weber das folgende Verfahren in Anwendung gebracht, welches er als Zurückwerfungsmethode bezeichnet. Dadurch, dass der Inductor aus seiner ursprünglichen Lage plötzlich um 90⁰ gedreht wurde, wurde die Nadel in Schwingung versetzt und es wurde mit dem Fernrohre der Stand der Nadel bei ihrer grössten positiven Elongation, welche sie nach $^1/_2$ Schwingungsdauer erreichte, an der Scala beobachtet. Nach Verlauf von $1^1/_2$ Schwingungsdauern gelangte die Nadel zu ihrer grössten negativen Elongation, welche ebenfalls an der Scala beobachtet wurde. Hierauf wurde in dem Augenblick, wo die wieder vorwärts schwingende Nadel ihren ursprünglichen Ruhestand passirte, also 2 Schwingungsdauern nach Beginn der Versuche, der Inductor um 180⁰ rückwärts gedreht. Die schwingende Nadel wurde dadurch mitten in ihrer Bewegung arretirt und rückwärts geworfen, worauf nun wieder zuerst ihre grösste negative und sodann ihre grösste positive Elongation an der Scala beobachtet wurde. Nach Verlauf von 4 Schwingungsdauern, in dem Augenblick, wo die Nadel, von ihrer letzten positiven Elongation zurückkehrend, ihren ursprünglichen Ruhestand passirte, wurde der Inductor wieder um 180⁰ vorwärts bewegt, worauf die nämlichen Elongationsbeobachtungen gemacht wurden, wie das erste Mal. Auf diese Weise wurden die Versuche fortgesetzt, bis eine hinreichende Beobachtungsreihe erhalten worden war. In der folgenden Tabelle sind die Resultate einer solchen Beobachtungsreihe zusammen-

gestellt. In der ersten Verticalreihe stehen die beobachteten Elongationen der Reihe nach unter einander. In der zweiten Columne sind die Mittelwerthe aus je zwei auf einander folgenden positiven und aus je zwei auf einander folgenden negativen Elongationen verzeichnet. In der dritten Columne endlich sind die Unterschiede der mittleren positiven und negativen Elongationen oder die Grösse der ganzen Schwingungsbogen angegeben.

467,1		
540,7		
	543,70	
546,7		
		80,10
461,4		
	463,60	
465,8		
		79,75
540,6		
	543,35	
546,1		
		79,25
462,3		
	464,10	
465,9		
		79,45
541,4		
	543,55	
545,7		
etc.	etc.	etc.

Der Mittelwerth für den ganzen Schwingungsbogen aus mehreren solchen Beobachtungsreihen war

79,8 Scalentheile,

die durch eine Drehung des Inductors um 90^0 bewirkte Elongation beträgt also

39,9 Scalentheile,

und danach ergiebt sich

$$tang\, v = \frac{39,9}{2\,.\,4088} = 0,00488,$$

da der Horizontalabstand des Spiegels von der Scala 4088 mm betrug.

Setzen wir nun für π, Σ, n, r', t und $tang\ v$ ihre Zahlenwerthe in Gleichung 1) auf Seite 760, so kommt

$$w = \frac{2\,.\,3,1415^2\,.\,104\,924\,000\,.\,1854}{338\,.\,10,282\,.\,0,00488} = 215\,100\,000\,000$$

oder

$$w = 2151\,.\,10^8.$$

Mit Berücksichtigung aller nothwendigen Correctionen*) fand Weber

$$w = 2166\,.\,10^8\,\frac{\text{Millimeter}}{\text{Secunde}}.$$

*) Siehe Wiedemann, Lehre v. d. Elektr. IV, S. 911. Kohlrausch, Praktische Physik 1887, S. 279.

Um diese Messung auf das (C. Gr. S.) System oder auf das praktische System (Ohm) umzurechnen, hätten wir zu berücksichtigen, dass

$$10^{10} \frac{\text{Millimeter}}{\text{Secunde}} = 10^{9} \frac{\text{Centimeter}}{\text{Secunde}} = \frac{\text{Erdquadrant}}{\text{Secunde}} = \text{Ohm}.$$

Bezüglich der neuesten und genauesten Bestimmungen der absoluten Widerstandseinheiten verweisen wir auf F. Kohlrausch's Arbeiten*).

204 **Die magnetoelektrische Maschine von Pacinotti-Gramme nach ihrer ursprünglichen Erklärung.** Im Jahre 1860 hat D. Antonio Pacinotti in Florenz eine elektromagnetische Maschine erfunden und im Jahre 1864 ausführlich beschrieben und abgebildet**), welche dann in Vergessenheit gerieth und 1871 von dem Belgier Zénobe Théophile Gramme unabhängig noch einmal erfunden wurde. Pacinotti hat schon gleich am Schlusse der citirten Beschreibung hervorgehoben, dass seine Maschine nicht bloss als elektromagnetischer Motor, sondern auch umgekehrt als magnetoelektrische Inductionsmaschine gebraucht werden könne.

Bei der Erklärung der Wirksamkeit dieser Maschine kann man auf zweierlei Weise vorgehen. Entweder folgt man den Ideen, welche ihre Erfinder geleitet haben und gelangt so zu der älteren Auffassung derselben, oder man geht von den Faraday'schen Ideen aus und legt die auf die Kraftlinien basirten Inductionsgesetze zu Grunde, wie wir es in den vorangegangenen Paragraphen gethan haben. Die letztere Methode führt unbedingt zu einem tieferen Verständniss dieses wichtigen Apparates; da aber auch der historische Weg der Entdeckung von Interesse ist, so wollen wir vorher auch diesen kennen lernen.

Zu diesem Zwecke gehen wir von einigen einfachen Vorlesungsexperimenten aus, welche sich unmittelbar an das in den §§. 197 und 198 Vorgetragene anschliessen***).

1. Versuch. Wir nehmen eine Drahtrolle zur Hand, deren Enden mit einem Galvanometer, z. B. dem auf S. 595, Fig. 482, beschriebenen Verticalgalvanoskop, oder einem projicirenden Spiegelgalvanometer in Verbindung stehen und demonstriren die mittelst eines Magnetstabes nach §. 197 hervorzurufenden Inductionsströme.

2. Versuch. Wir wiederholen dieses Experiment mittelst eines Stabes, der aus zwei Magnetstäben zusammengesetzt ist, die mit ihren gleichnamigen Polen an einander stossen (Fig. 648) und zeigen, dass dabei die Richtung des Inductionsstromes jedesmal in dem Momente wechselt, wo ein Indifferenzpunkt die Drahtrolle passirt.

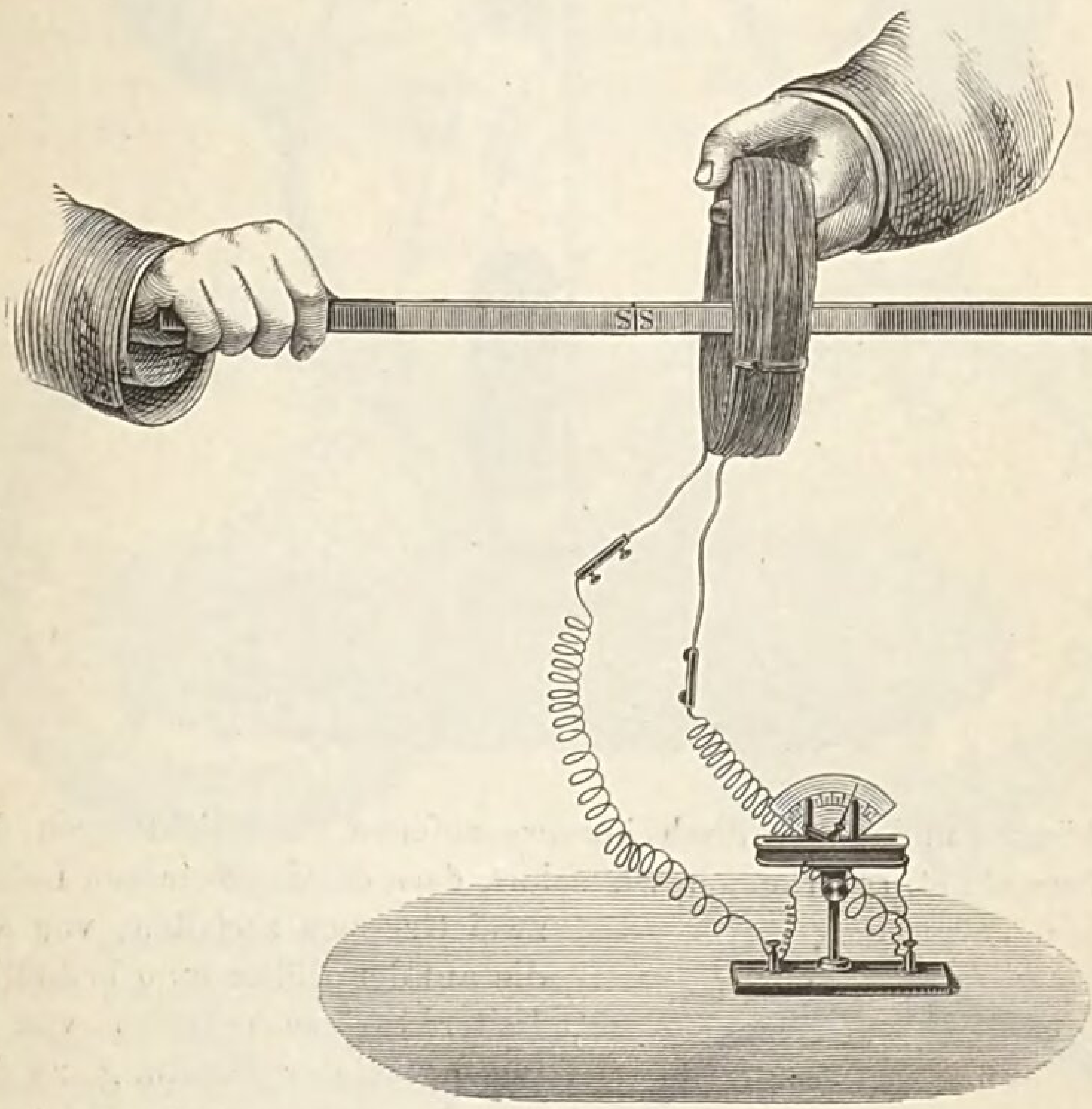
*) Sitzungsber. d. Königl. bayerischen Akademie 1888, S. 3.

**) Il Nuovo Cimento, Bd. XIX, p. 378.

***) Zur Anstellung dieser hier in einfachster Weise ausgeführten Versuche sind von D. H. Zwick bequeme Schulapparate construirt worden, welche von F. Ernecke in Berlin geliefert werden.

3. Versuch. Wir stellen zwei Drahtrollen vertical über einander auf, wie die Fig. 649 (a. f. S.) ersichtlich macht, verbinden dieselben unter einander, wie die Drahtspulen eines Hufeisenmagnets und schalten ausserdem wiederum das Galvanoskop ein. Dann nehmen wir zwei halbkreisförmige magnetisirte Stahlstäbe, Fig. 650 (a. f. S.), stecken dieselben durch die beiden Drahtringe und vereinigen sie mittelst aufgesteckter Messinghülsen zu einem Ringmagnete, so zwar, dass die gleichnamigen Pole einander zugekehrt sind. Die entgegengesetzt magnetischen Hälften der Stäbe sind durch dunkle und helle Färbung wie bei den Compassnadeln

Fig. 648.

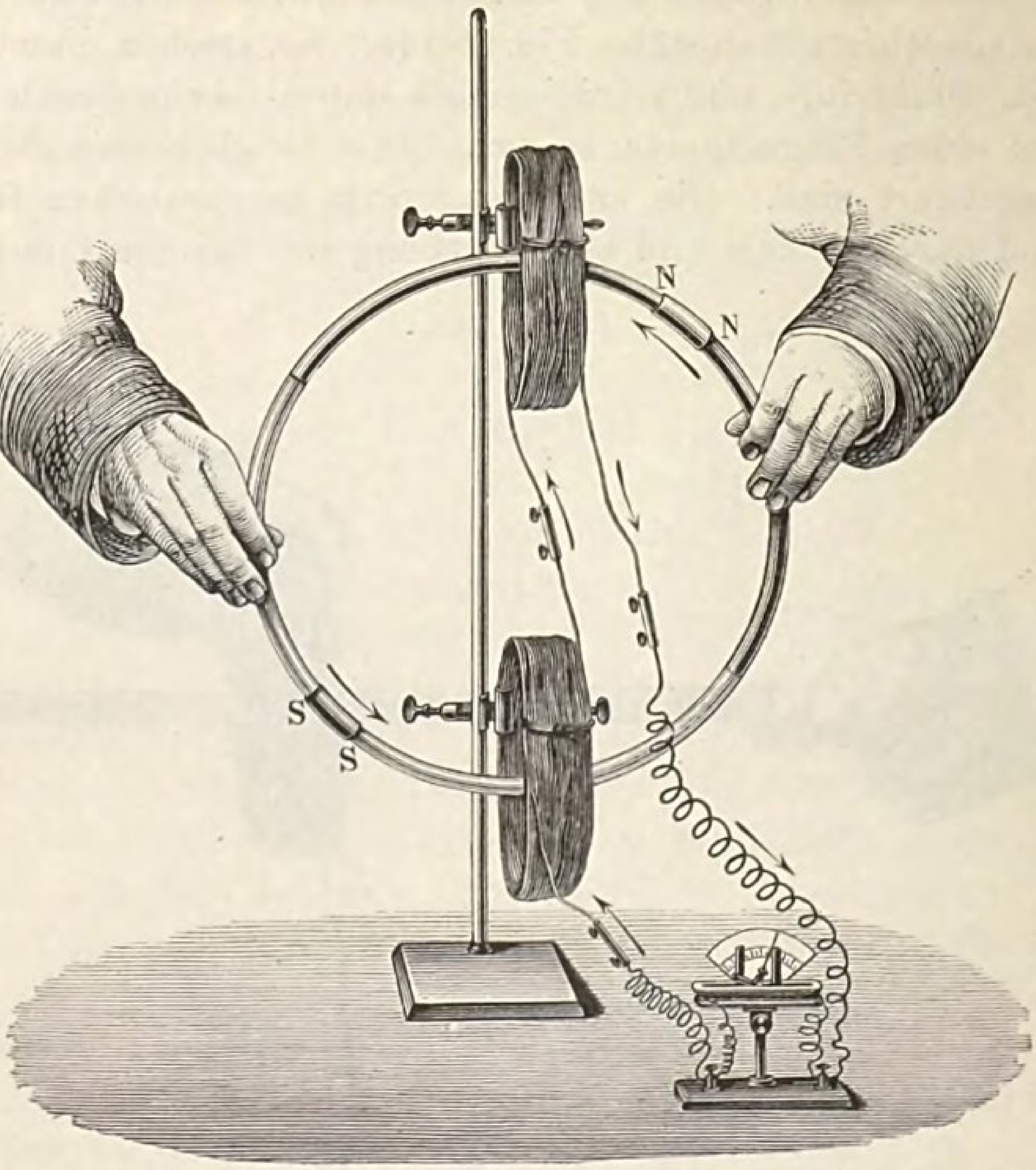


erkennbar gemacht. Wenn wir nun den Ring stets in demselben Sinne drehen, so erhalten wir am Galvanoskope während einer ganzen Umdrehung nach einander zwei entgegengesetzte Ströme, deren Richtung in dem Momente umgekehrt wird, wo die Indifferenzpunkte die beiden Drahtrollen passiren. Der magnetische Ring bringt also dieselbe Wirkung hervor, wie eine unendliche Reihe von Magnetstäben, die nach Fig. 648 an einander gefügt sind.

Wir wollen in der Folge, um uns bequemer ausdrücken zu können, ausser dem vereinigten Nordpol *n* und dem vereinigten Südpol *s* des Ringmagnets auch noch die beiden indifferenten Stellen als Westpunkt *w* und Ostpunkt *o* bezeichnen. Denken wir uns nun die

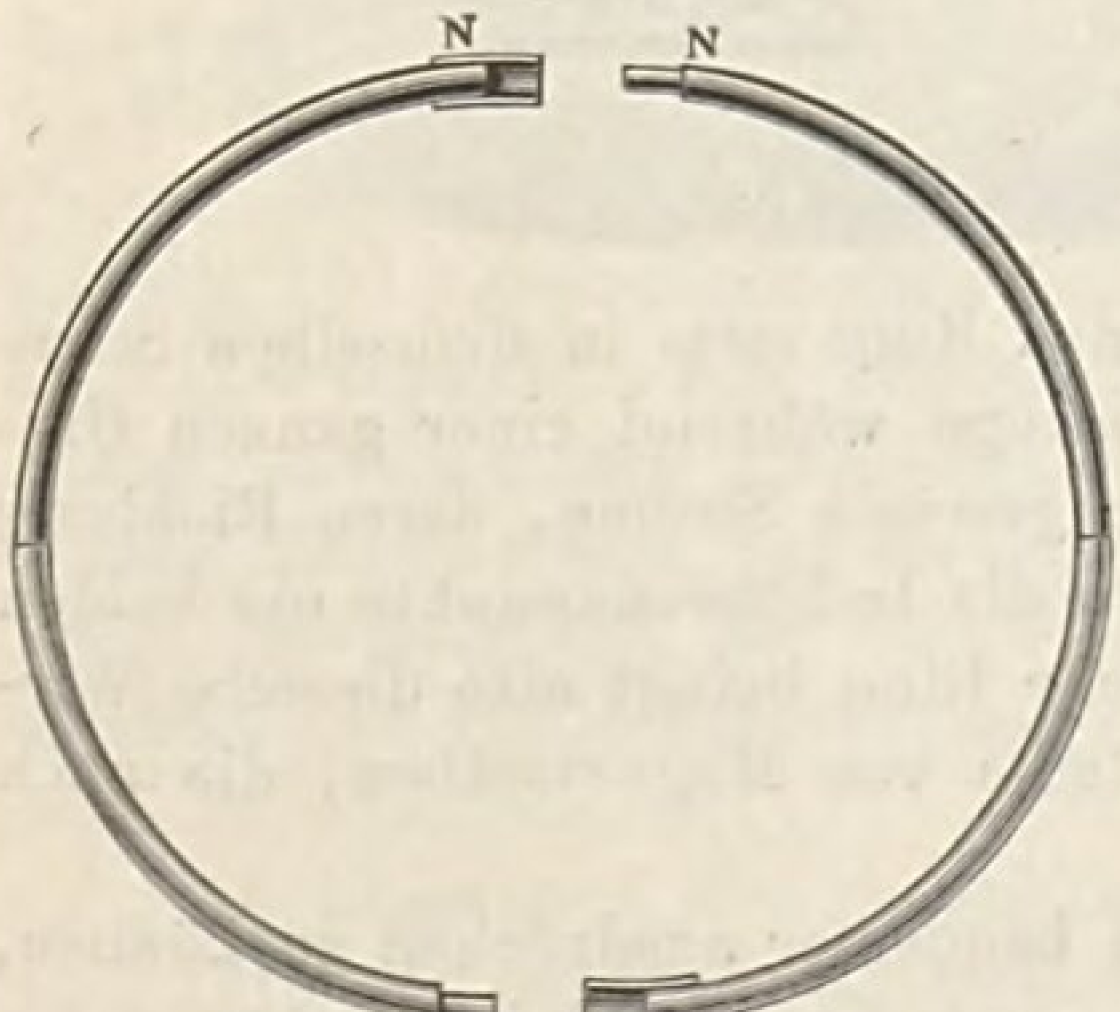
Anzahl der ringförmigen Leiter vermehrt und über den ganzen Magnetring vertheilt, wie Fig. 651 andeutet, ferner die Rotationsrichtung des

Fig. 649.



Magnetringes und die dadurch hervorgerufenen Stromrichtungen durch Pfeile bezeichnet, so erkennen wir sofort, dass die ringförmigen Leiter in zwei Gruppen zerfallen, von denen die auf der Hälfte *wso* befindlichen Leiter Ströme erhalten von entgegengesetzter Richtung zu jenen auf der Hälfte *onw*. Diese Vertheilung wechselt aber ihren Ort mit der Rotation des Magnetringes, so dass also auch die Orte jener Ringleiter, welche sich an den neutralen Grenzen der beiden Hälften befinden, im Kreise herumwandern. Dies letztere ist nicht mehr der Fall, wenn wir jetzt umgekehrt den Magnetring stillstehend und dafür die Ringleiter nach entgegengesetzter Richtung, also in Fig. 651 rechts rotirend denken. Die Stromrichtungen

Fig. 650.



bleiben dann am selben Orte constant dieselben. Es handelt sich nun darum, diese Einzelströme zu sammeln. Zu diesem Zwecke verbinden wir sämmtliche Einzelringe zu einer zusammenhängenden Ringspirale, Fig. 652, welche wir rechts herum um die (auf der Zeichnungsebene senkrecht stehende) Axe des feststehenden Magnetringes rotirend denken. Alle Einzelströme der linksseitigen (südmagnetischen) Hälfte sammeln sich dann zu einem Gesammtstrome, der in der Spirale von *w* über *s* nach *o* fliesst. Ebenso sammeln sich sämmtliche rechtsseitigen Ströme zu einem Gesammtstrom, der in der Spirale von *w* über *n* nach *o* gerichtet ist. Um diese beiden Ströme in einen einzigen zu vereinigen, müssen wir dafür sorgen, dass zwischen den Spiralwindungen, welche sich momentan über den Punkten *o* und *w* befinden, eine Leitung hergestellt bleibt. Zu diesem Zwecke könnten wir uns vorstellen, dass direct auf den entblössten Drahtwindungen bei

Fig. 651.

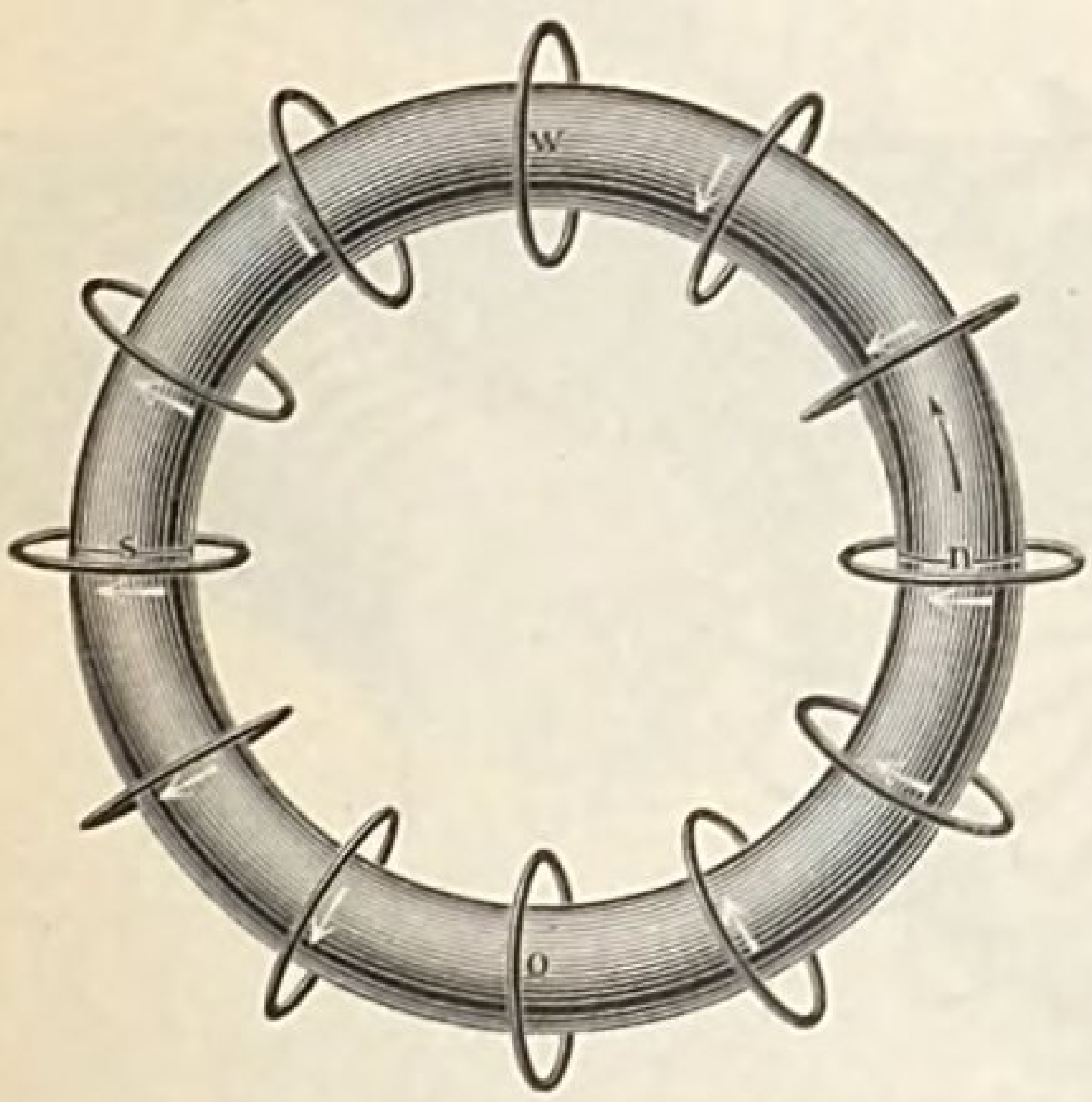
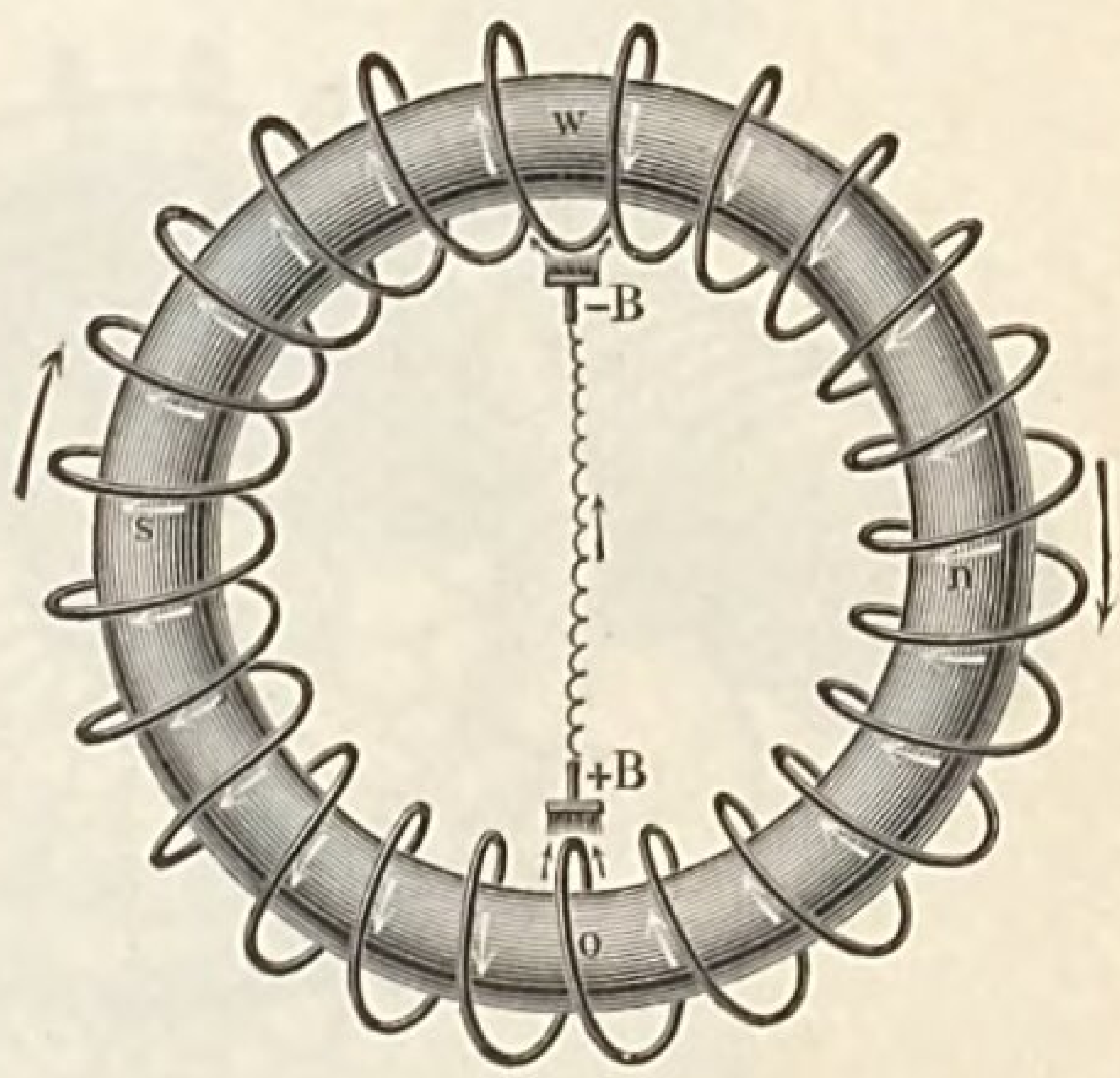


Fig. 652.

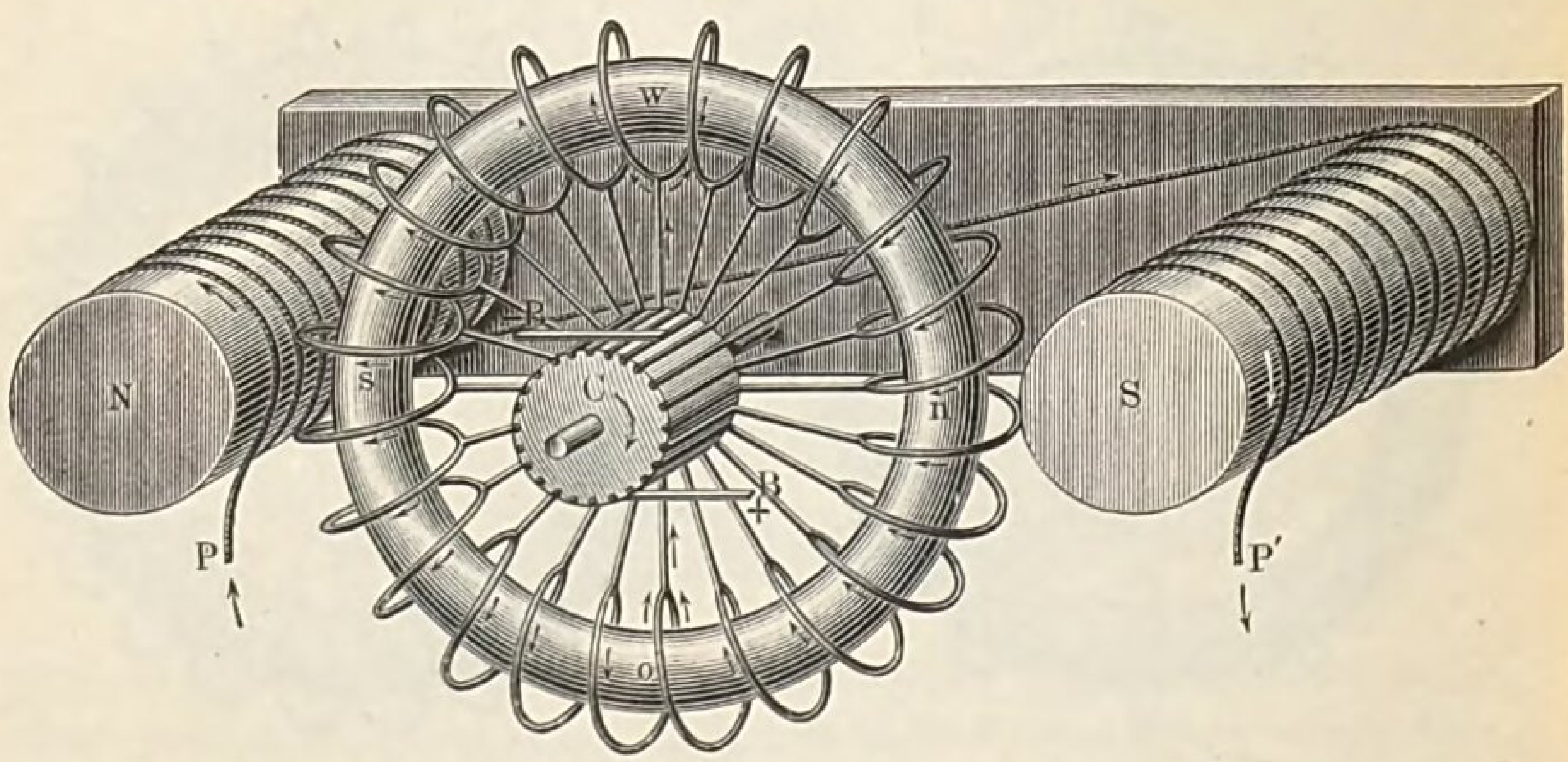


w und *o* feststehende Contactfedern oder Contactbürsten $-B$ und $+B$ schleifend aufliegen, welche den Strom aufnehmen. Sind diese Contactvorrichtungen derart construirt, dass immer der nächste Ring zum Contact kommt, bevor der vorausgehende den Contact verlässt, so erhalten wir einen continuirlichen Inductionsstrom von $+B$ über den Verbindungsdraht nach $-B$. Der Apparat wirkt demnach, so lange er rotirt, ähnlich wie eine Batterie, deren Pole die Punkte $+B$ und $-B$ sind.

Es entsteht aber jetzt die Frage, wie wir den Magnetring festhalten wollen, während die Spirale über denselben rotirt, denn es ist klar, dass jede Stütze, welche den Magnetring festhält, die Spirale hindern würde, zu rotiren. Diese Schwierigkeit ist nun auf zwei ganz verschiedenen Wegen überwunden worden. Den einen Weg schlug Kravogl bei seinem im §. 198 beschriebenen elektromagnetischen Motor ein, indem er die obere Hälfte des Magnetringes ganz weg liess, die untere Hälfte innerhalb der ringförmigen Röhre, um welche die Spirale ge-

wickelt war, auf Frictionsrollen stellte und es der Schwere überliess, den Magnet festzuhalten, während die Spirale rotirte. Den anderen, wie der Erfolg gezeigt hat, zweckmässigeren Weg haben Pacinotti und später Gramme eingeschlagen, indem sie nur die Magnetpole festhielten, während sie das weiche Eisen, in welchem die Pole durch Influenz von aussen geweckt wurden, mitsammt der Spirale um die Axe rotiren liessen. Der Pacinotti'sche Apparat hatte also die in Fig. 653 skizzirte Construction. Zwischen den Polen *N* und *S* eines feststehenden Stahlmagnets oder Elektromagnets rotirt um die Axe *C* der weiche Eisenring *sn* mit der fest auf ihm aufgewickelten Spirale. Durch die Influenz der äusseren Pole *N* und *S* entstehen in den nächstliegenden Stellen des Eisenringes die Pole *s* und *n*, deren Magnetismus an der Stelle verbleibt, während die Eisenmassen vorüberwandern. Ueber diese Influenzpole werden die Spiral-

Fig. 653.



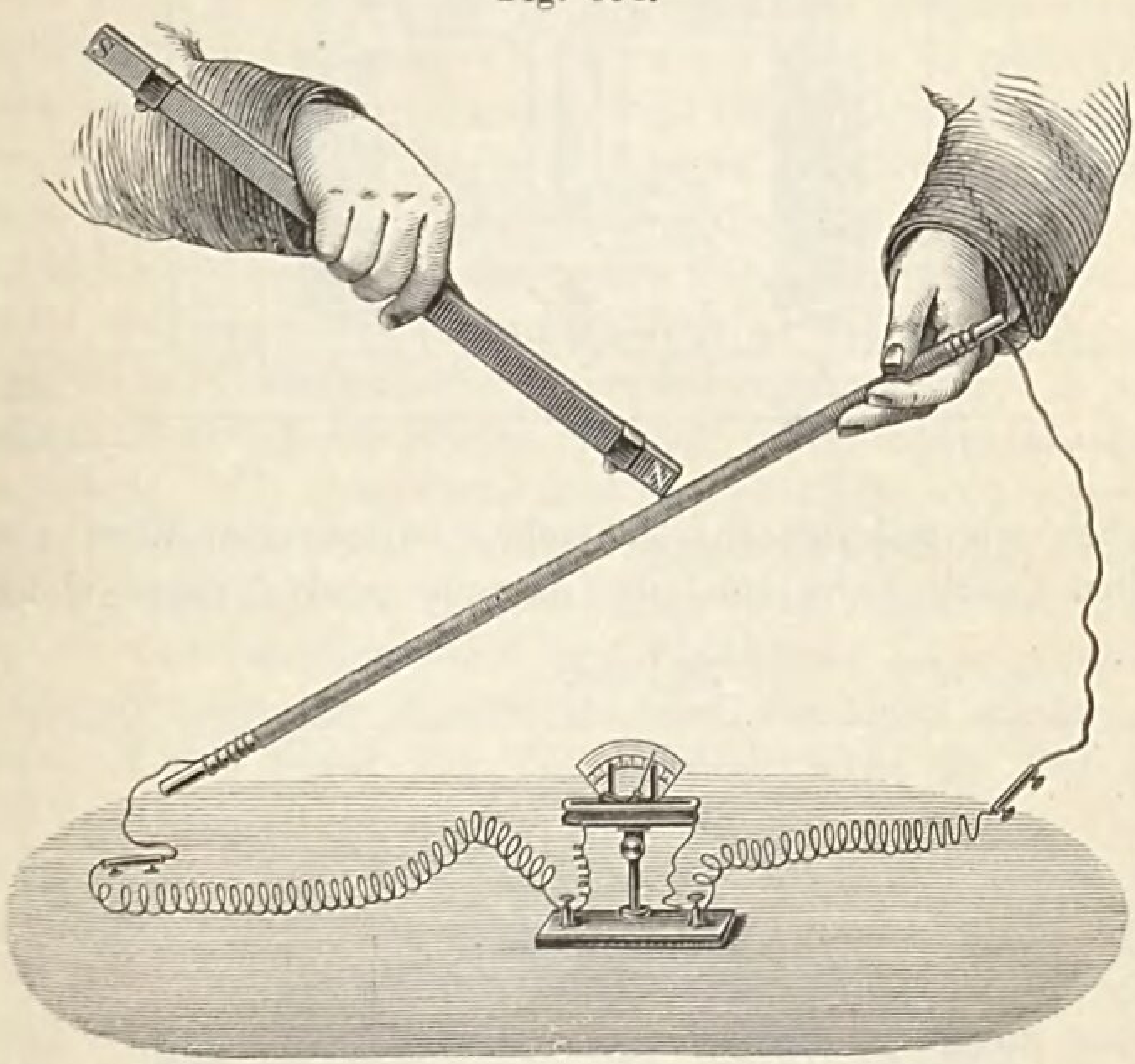
windungen hinweggeführt. Die Contactvorrichtung ist hier nicht direct an den Spiralwindungen selbst, sondern an Zuleitungsstücken angebracht, welche isolirt auf der Mantelfläche des die Axe umgebenden Cylinders *C* befestigt sind und dann, im rechten Winkel umbiegend, zu den Spiralwindungen führen. Dabei ist es nicht nöthig, jede einzelne Umwindung zum Contacte zu führen, es genügt, nach einer Gruppe von Windungen einen solchen Zuleiter einzuschalten.

Die Axe mit den Contactstücken wird Commutator oder Collector genannt. Die Fig. 653 ist nur eine schematische; bevor wir den von Pacinotti wirklich ausgeführten Apparat beschreiben, wollen wir noch ein Experiment anstellen, welches beweist, dass ein innerhalb einer Spirale in weichem Eisen erzeugter und fortwandernder Influenzpol ebenso Inductionsströme erweckt, wie ein permanenter Magnetpol.

4. Versuch. Fig. 654. Wir nehmen eine Stange weichen Eisens, umwickeln dieselbe der ganzen Länge nach mit isolirtem Drahte, ver-

binden dessen Enden mit einem Galvanoskop (welches bei der Ausführung dieser Versuche weiter entfernt stehen muss, als in der Figur, damit der Magnet nicht direct darauf einwirken kann) und führen nun den Pol eines Stahlmagnets rasch dem Stabe entlang, oder wir halten den Pol fest und führen den umwickelten Stab rasch an demselben nahe vorbei. Der durch Influenz in dem Eisenstabe entwickelte entgegengesetzte Magnetismus wandert dann durch die Spirale, beziehungsweise die Spirale geht über den hervorgerufenen Pol hinweg, ohne dass das Eisen der Spirale gegenüber in Bewegung kommt. Die Ausschläge des Galvanoskops zeigen uns an, dass der Inductionsstrom ebenso entsteht, wie wenn das Eisen sammt seinem Magnetpol sich durch die Spirale bewegt hätte.

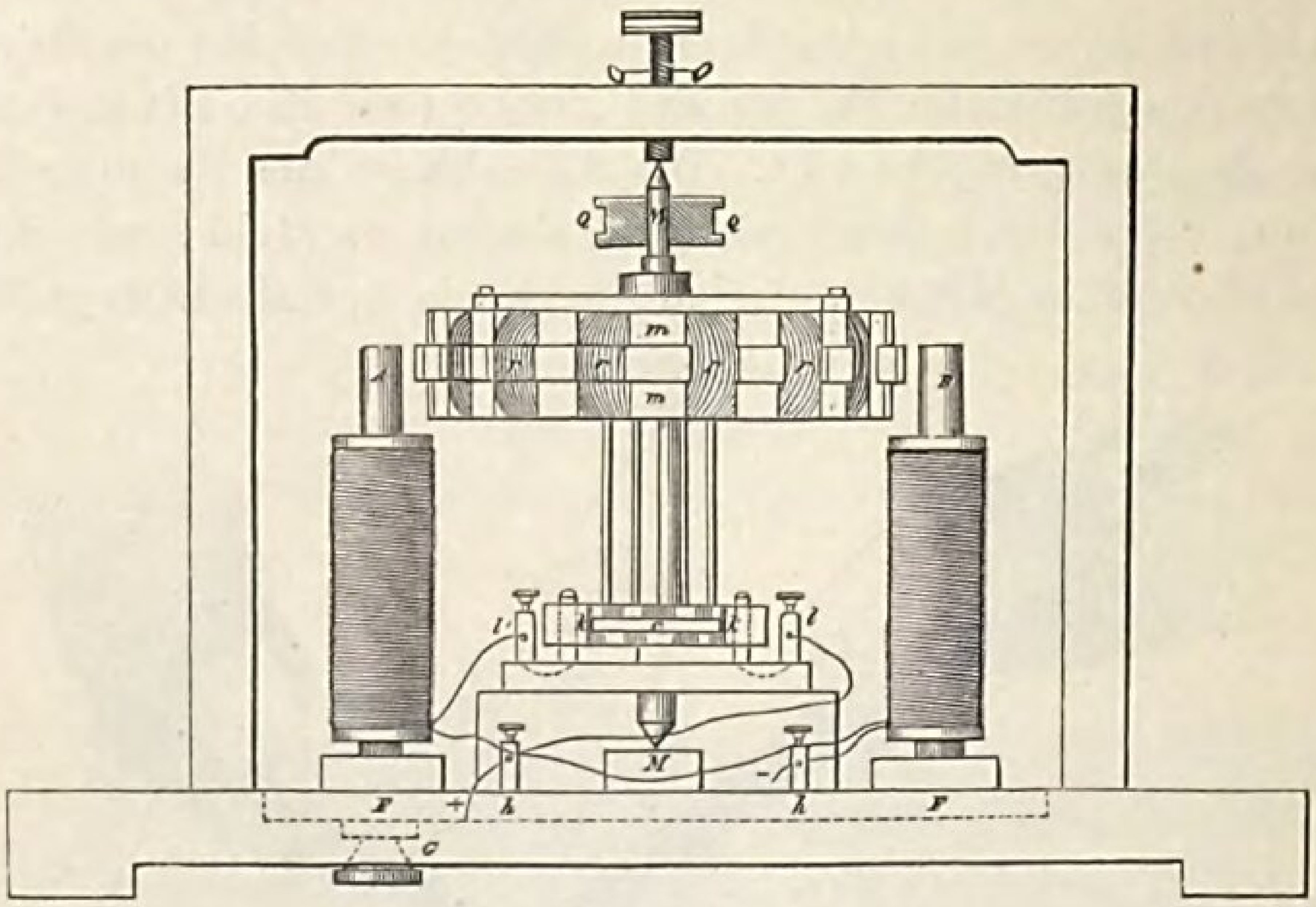
Fig. 654.



Des historischen Interesses wegen wollen wir nun die Pacinotti'sche Ringmaschine nach den Originalabbildungen, Fig. 655 u. 656 (a. f. S.), beschreiben. Die letzteren sind etwas mangelhaft; man erkennt jedoch sofort die Haupttheile. *A* und *B* sind die feststehenden Pole eines Elektromagnets, dessen beide Schenkel durch die Eisenschiene *FF* verbunden sind, *rr* ist der spiralförmig umwickelte Eisenring, *k* und *k* sind die beiden Contactrollen, welche den Contactstücken $-B$ und $+B$, Fig 653, entsprechen, welche jedoch aus der in der Zeichnung angegebenen Lage gegen die um 90° abweichende verschoben werden müssen, wenn die Maschine fungiren soll. Dient die Maschine als elektromagnetischer Motor, so tritt der Strom bei *h* (+) ein, geht über die Klemme *l* zur Contactrolle *k*, von dort zu den Windungen des Ringes, theilt sich daselbst und durchläuft die Spiralen der beiden Ringhälften bis zur gegen-

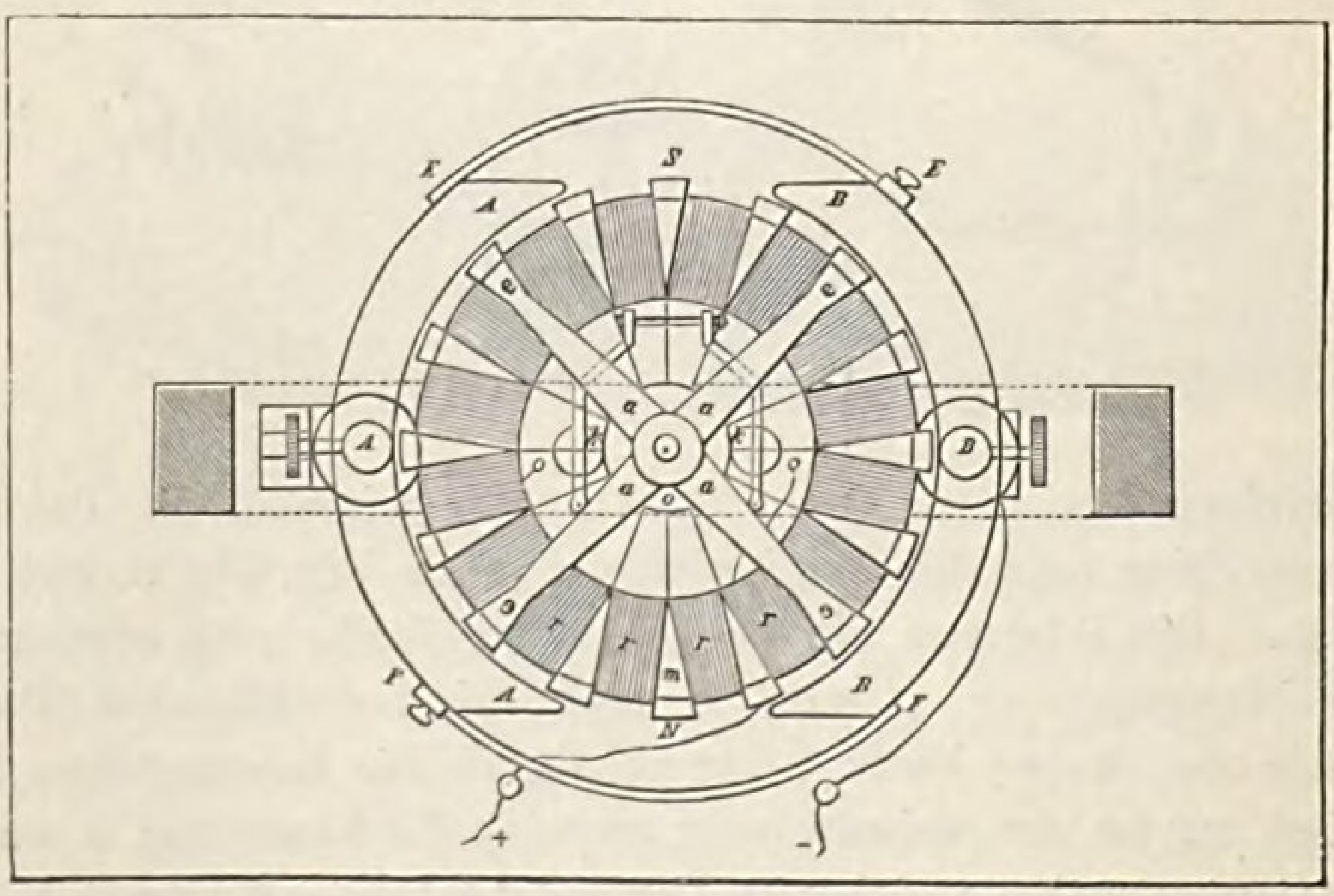
überliegenden Stelle des Ringes, vereinigt sich dort wieder und gelangt über die andere Contactrolle *k* zur Klemme *l'*, dann zur Spule des Schenkels *A*, von dort zur Spule des Schenkels *B* und verlässt bei *h* (—) den Apparat. Die umgekehrte Anwendung des Apparates als Inductions-

Fig. 655.



apparat geben wir mit den ins Deutsche übertragenen Worten des Erfinders selbst (nach Schellen, die magnet- und dynamo-elektrischen

Fig. 656.



Maschinen) und zwar zum Beweise, dass Pacinotti das Princip dieser Maschine ganz richtig verstanden und ausgesprochen hat.

„Wenn man den Elektromagnet *AB*, Fig. 655 u. 656, durch einen permanenten Magnet ersetzte und man den Transversalmagnet (den Ring) rotiren liesse, so hätte man in der That eine magnet-elektrische

Maschine, welche einen continuirlichen stets in derselben Richtung fliessenden Inductionsstrom lieferte. Um auf dem Commutator die geeignetste Stelle zu finden, wo dieser inducirte Strom (aus dem Ringe in die Leitung) übergeführt werden muss, bedenken wir, dass den Polen des feststehenden Magnets gegenüber durch Influenz in dem drehbaren Ringe und zwar an den Endpunkten eines Durchmessers desselben entgegengesetzte Pole entstehen. Diese Pole *NS* behalten während der Drehung des Ringes um seine Axe ihre feste Lage, und so dürfen wir bezüglich des Magnetismus und folglich auch der inducirten Ströme die Sache so ansehen, als ob die Drahtspulen um den Ring rotirten und der Eisenring selbst unbeweglich feststehen bliebe.“ Pacinotti untersucht dann weiter die Richtung der Inductionsströme und bestimmt ganz richtig, dass die Contactrollen am Commutator in rechten Winkeln zu der magnetischen Kraftlinie des Elektromagnets anzubringen sind. „Wenn man dagegen die Stromsammler am Commutator in der Verbindungslinie der Pole des Elektromagnets anbringen wollte, würden sie bei der Drehung des Ringes keinen Strom erhalten.“ Pacinotti hat dann theils mittelst eines permanenten Magnets, theils durch galvanische Magnetisirung des Elektromagnets *A B* und durch mechanische Drehung des Ringes wirklich einen constanten Inductionsstrom erzeugt. Wir constatiren dies ausdrücklich, weil später versucht wurde, Pacinotti das Verdienst seiner Erfindung streitig zu machen. Diese Versuche wurden auf den Umstand gegründet, dass in den Figg. 655 und 656 die Contactrollen nicht in der richtigen Lage gezeichnet sind. Auch dadurch kann ein Missverständniss veranlasst werden, dass die Buchstaben *N* und *S* der Fig. 656 offenbar nicht die Bedeutung der im Text Pacinotti's erwähnten Pole *N* und *S* haben, sondern die Bedeutung jener Pole, welche durch den Strom im Ringe entstehen, wenn der Apparat als elektromagnetischer benutzt wird. Diese Irrthümlichkeiten der Zeichnung können aber gegenüber der ganz deutlichen und correcten Fassung des Textes nicht in Betracht kommen und muss daher Pacinotti unbedingt als der erste Erfinder und Constructeur der Maschine bezeichnet werden, welche unter Aufwand von Arbeitskraft einen continuirlichen, stets gleich gerichteten Inductionsstrom liefert.

Dem Belgier Zénobe Théophile Gramme, welcher als Mechaniker bei der französischen Gesellschaft l'Alliance beschäftigt war, bleibt das unbestreitbare Verdienst, die von Pacinotti erfundene, aber unbeachtet gebliebene Maschine im Jahre 1871 unabhängig neu erfunden und in constructiver Beziehung so verbessert zu haben, dass hierdurch ihre praktische Einführung ermöglicht wurde; deshalb wird diese Maschine meistens die Gramme'sche Maschine genannt.

Eine in technischer Hinsicht sehr bemerkenswerthe Verbesserung, welche wir Gramme verdanken, ist die Ersetzung der mangelhaften Contactfedern oder Contactrollen durch die Contactbürsten, das sind

Bündel von Kupferdrähten, welche auf den Zuleitern (Contactstücken) des Commutators federnd aufliegen.

Den massiven Eisenkern ersetzte Gramme aus weiter unten zu erörterndem Grunde durch ein Bündel von unter sich isolirten Eisendrähten. Die Fig. 657 zeigt einen umwickelten Ring aus Eisendrähten in zerlegtem Zustande. Die rechtwinklig abgebogenen kupfernen Leitungsstücke *RR* haben die Bedeutung der Speichen in Fig. 653; diese Leitungsstücke sind unter einander und von dem Ring durch das Holzstück *H* isolirt, dagegen mit den einzelnen Abtheilungen der Drahtspirale in der aus der Figur ersichtlichen Weise verbunden.

Fig. 657.

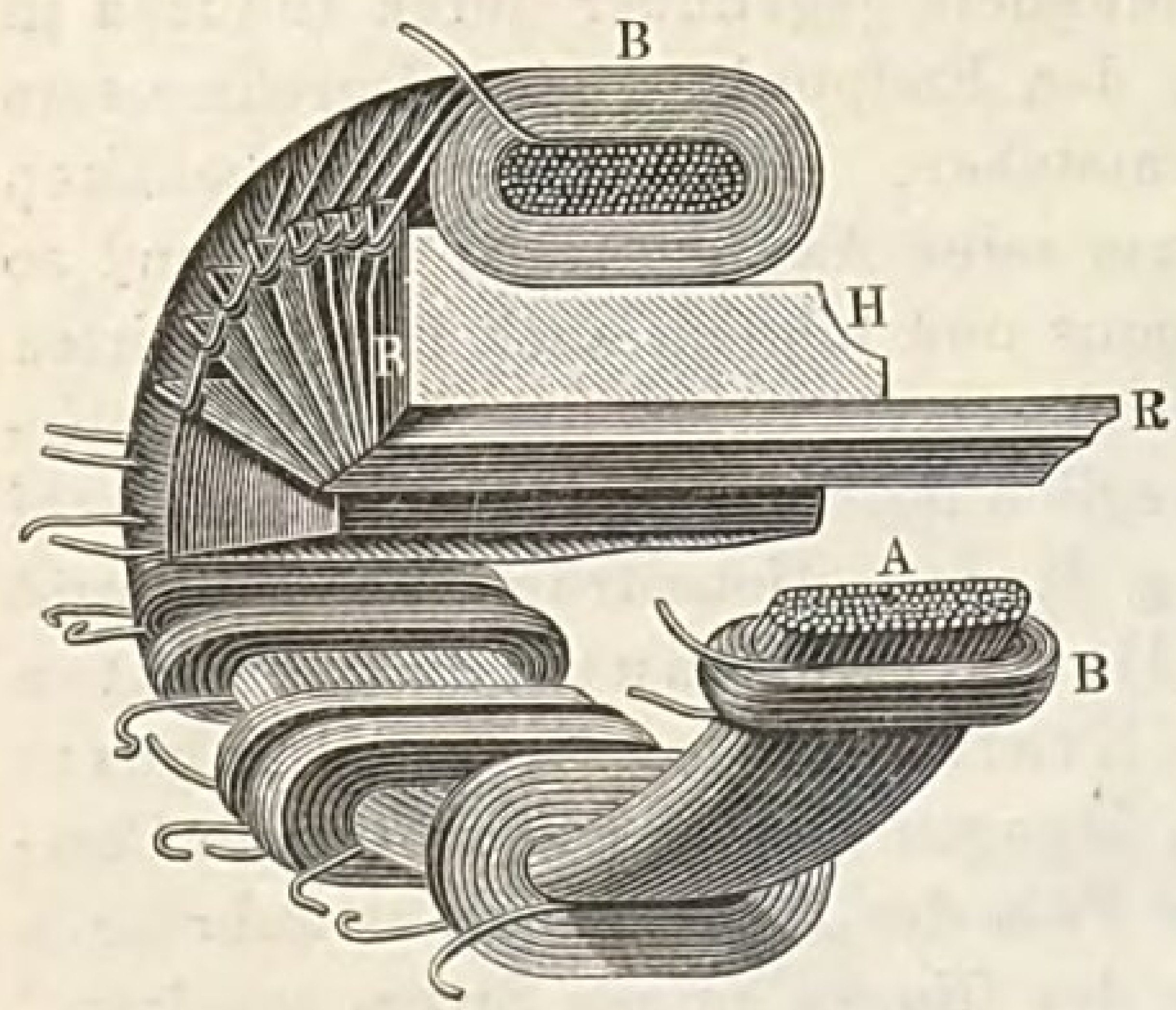
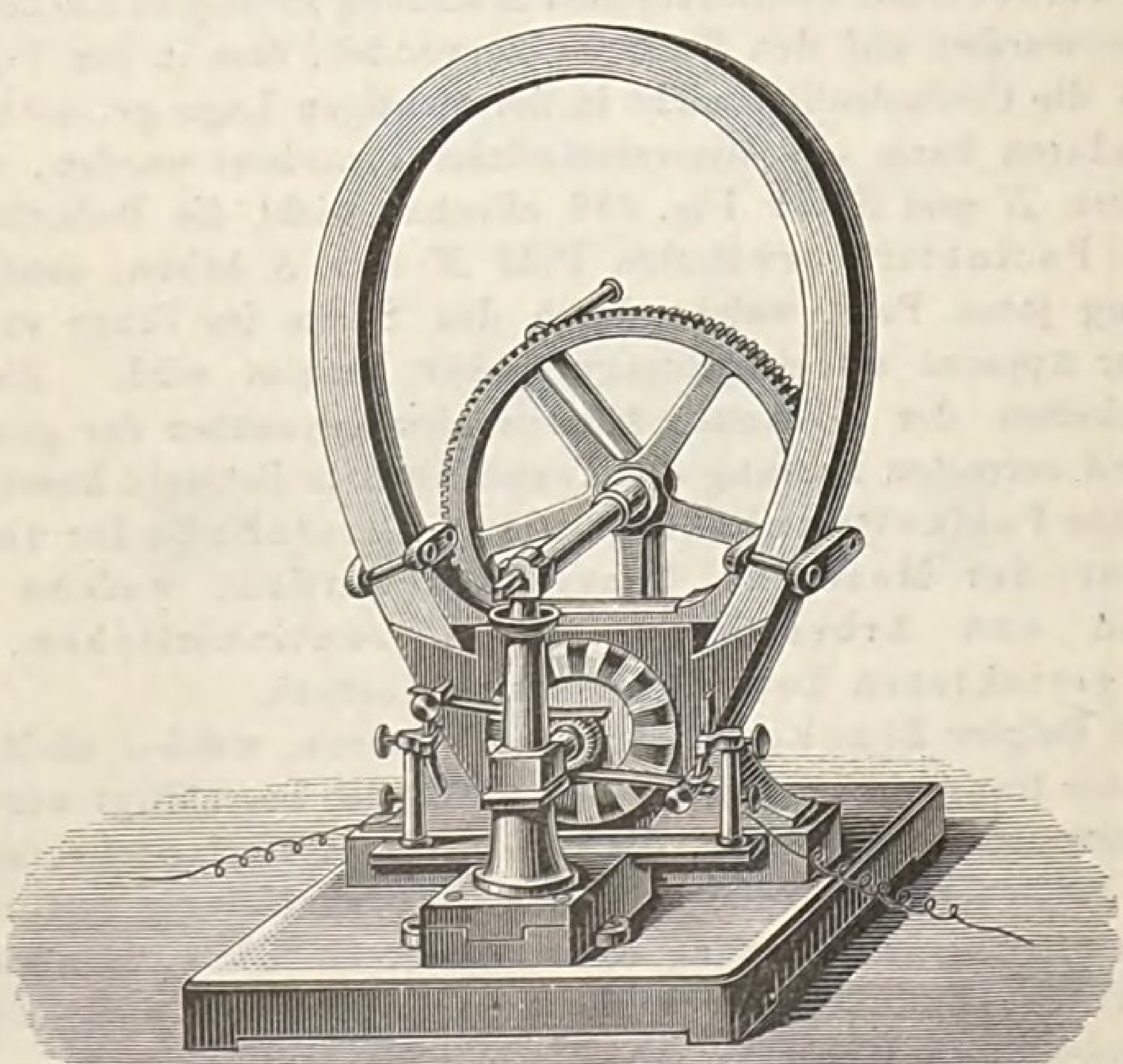


Fig. 658 zeigt eine magneto-elektrische Maschine von Gramme, als deren Magnet ein sogenannter Blättermagnet von

Fig. 658.



Jamin (§. 7, S. 19) fungirt. Derselbe ist aus vielen Stahllamellen zusammengesetzt, welche an beiden Enden mit Armaturen aus weichem

Eisen versehen sind, welche letzteren den rotirenden Ring von links und rechts eng umschliessen. Die übrigen Theile der Figur sind nach Erklärung der schematischen Fig. 653 leicht zu erkennen.

Zur Nomenclatur haben wir noch zu bemerken, dass man die Magnete oder Magnetschenkel, in deren magnetischem Felde der Inductionsstrom zu Stande kommt, die Feldmagnete, den rotirenden Theil, sei es nun ein Pacinotti'scher Ring, oder eine v. Hefner-Alteneck'sche Trommel (§. 201) den Anker oder die Armatur (Ringanker, Ringarmatur, Trommelanker, Trommelarmatur) zu nennen pflegt. Der eiserne Bestandtheil des rotirenden Theils heisst der Armaturkern, seine Umwicklung die Armatur- oder Ankerwicklung; die Vorrichtung endlich, welche den Inductionsstrom von der Ankerwicklung auf die feststehenden Bürsten überträgt, heisst man den Commutator oder Collector.

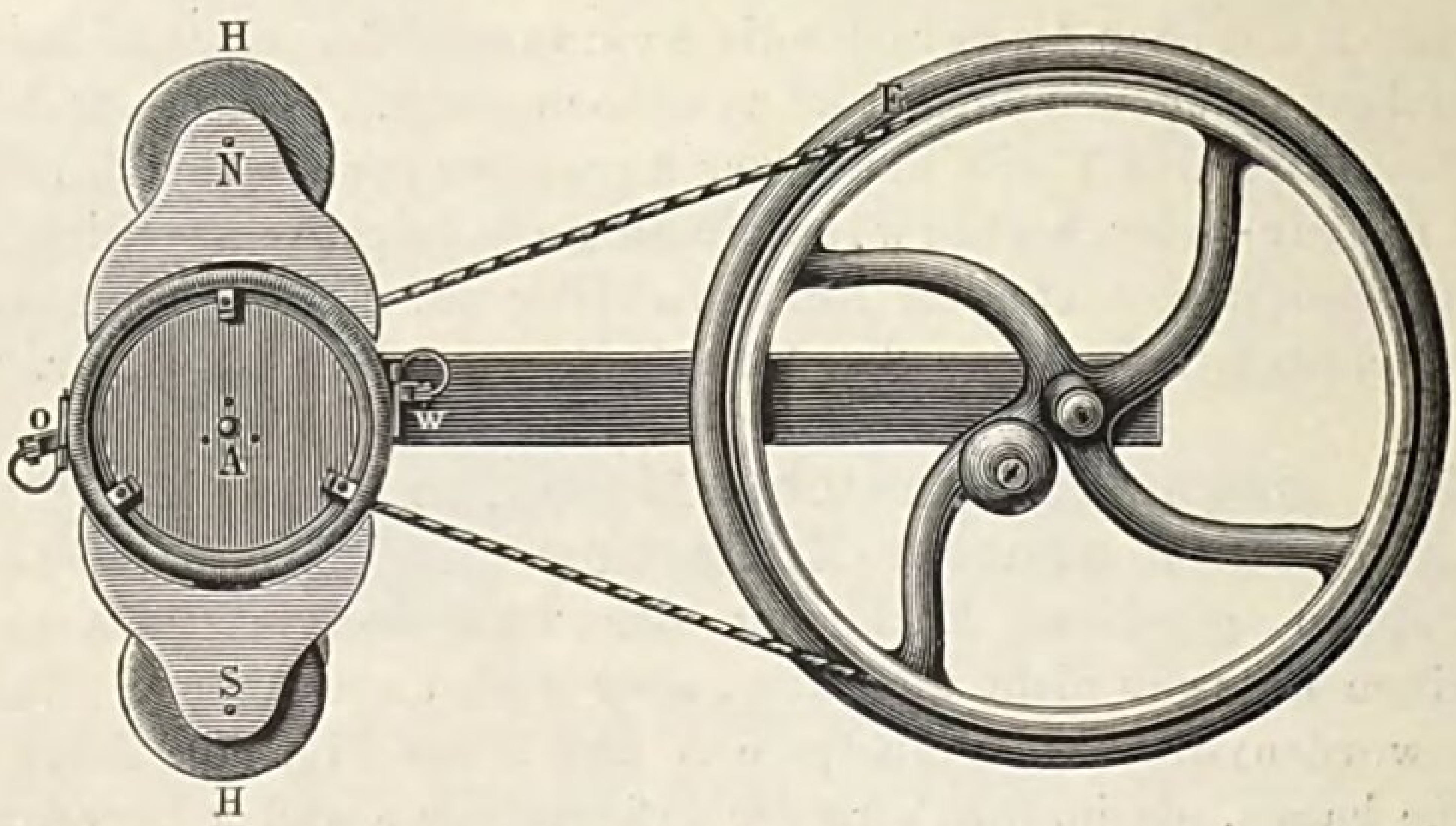
Die magnetoelektrische Maschine von Pacinotti-Gramme nach neuerer Erklärung. 205 Die im vorangegangenen Paragraphen gegebene Erklärung der Pacinotti-Gramme'schen Maschinen ist zwar nicht unrichtig, aber doch ungenügend. Nach derselben würden die Feldmagnetpole N und S der Fig. 653 keine andere Aufgabe haben, als im Ringkern die Influenzpole s und n hervorzurufen, denen allein dann die Inductionswirkung in den darüber hinweggehenden Spiralwindungen zufiele. Wir gelangen zu einer vollständigeren Erklärung der Wirkungsweise der Maschine, wenn wir von den Kraftlinien der Feldmagnete ausgehen und untersuchen, welchen Verlauf dieselben nehmen und in welcher Weise dieselben von den Spiralwindungen des Ankers durchschnitten werden.

Um die theoretischen Ergebnisse einer solchen Untersuchung durch das Experiment zu controliren, hat der Verfasser eine eigene Versuchsmaschine nach dem System Pacinotti-Gramme construirt, welche dazu bestimmt ist, ihre eigenen Kraftlinien zur Darstellung zu bringen. Dabei kam es begreiflicherweise nicht auf eine solche Construction an, welche kräftige Ströme liefert, sondern auf eine solche, welche die Kraftlinien unter den mannigfaltigsten Versuchsbedingungen herzustellen gestattet.

Fig. 659 (a. f. S.) zeigt diesen Apparat von oben gesehen, Fig. 660 von seitwärts in perspectivischer Darstellung in etwa $1/8$ der nat. Grösse. Die Feldmagnete SS' und NN' sind unten durch ein prismatisches Eisenstück verbunden und von den Holzspulen H, H' und den Drahtwindungen D, D' umgeben. Zwischen ihnen ist eine verticale Drehungsaxe gelagert, welche durch das Schwungrad E mit Kurbel in Rotation versetzt werden kann. Auf diese oben schwach conisch verjüngte Axe wird mit Hülfe einer conischen Hülse eine Messingscheibe A aufgesetzt, an deren Rande der Ringanker mittelst dreier Bügel festgeschraubt ist. Dieser Ringanker besteht aus einem Eisenreif von rechteckigem Querschnitt mit abgerundeten Kanten, welcher mit einer einzigen Lage eines

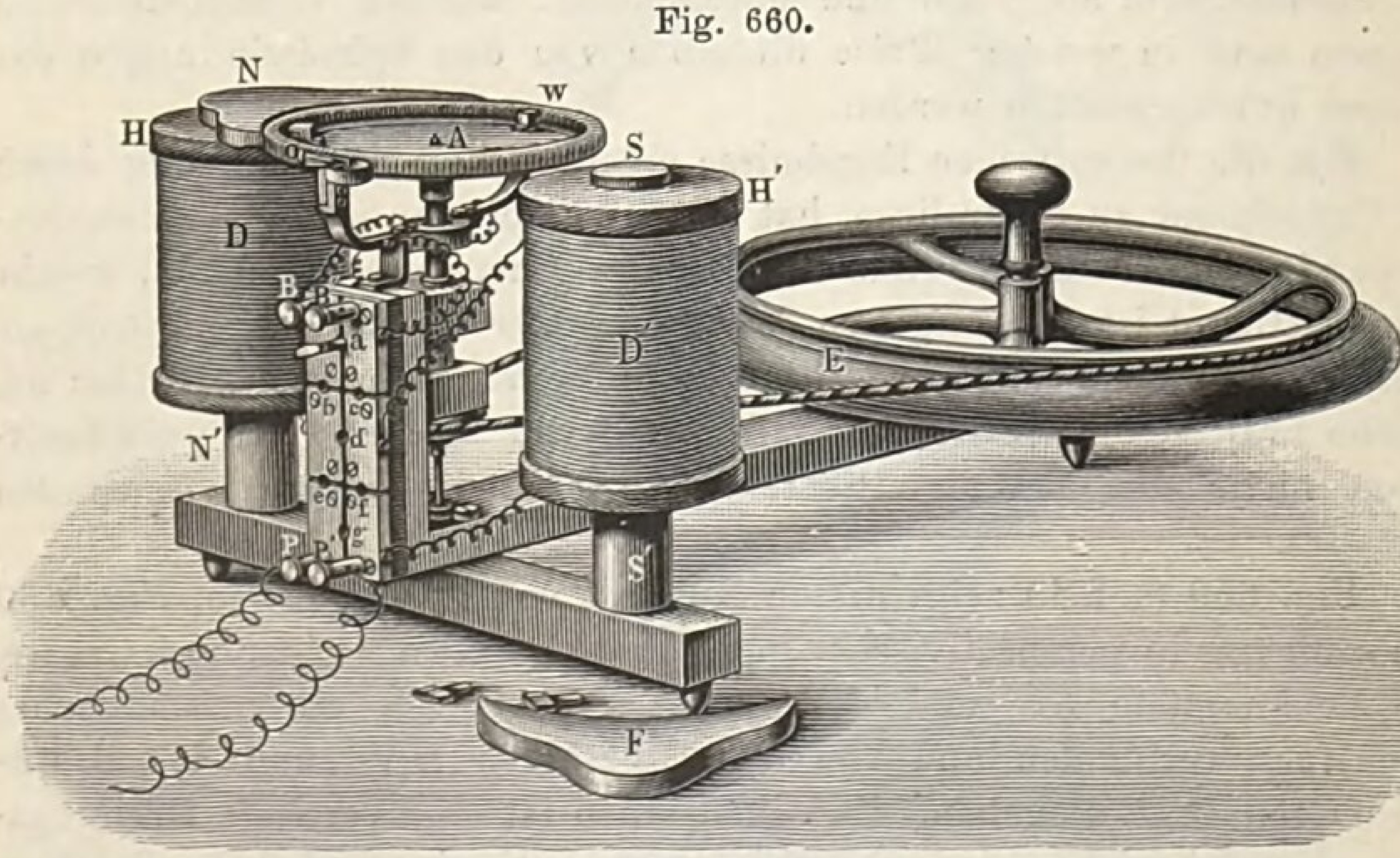
mit Wolle und dicker Firnissschichte isolirten, ungefähr 1 mm dicken Kupferdrahtes so umwickelt ist, dass letzterer eine in sich geschlossene Spirale bildet. Am äusseren, über die Metallplatte A hervorragenden Umfange sind die Windungen blossgelegt und flach gefeilt. Auf ihnen schleifen bei der Drehung zwei kleine Kupferdrahtbürsten O und W,

Fig. 659.



welche durch bogenförmige Stahlfedern angedrückt und von zwei metallenen Armen getragen werden. Die letzteren sind isolirt von einander an einer die Rotationsaxe umgebenden Scheibe befestigt und können

Fig. 660.



unabhängig um dieselbe Verticalaxe gedreht und festgestellt werden, so dass die Bürsten an beliebiger Stelle des Umfanges zum Contact gelangen. Auf die cylindrischen Pole können nach Bedarf Polschuhe von der in Fig. 659 und 660 F abgebildeten Form aufgesetzt werden. Dieselben haben zu diesem Zwecke an der Unterseite eine entsprechende

cylindrische Vertiefung; ausserdem hindert ein vorspringender Stift ihre Drehung. Auf die Holzspulen H, H' endlich kann ein in der Figur nicht abgebildeter Holzrahmen aufgesetzt werden, auf welchen ein rechteckig zugeschnittenes Blatt Kartenpapier aufgelegt wird. Das letztere wird vor dem Aufsetzen des Rahmens auf die Maschine mit feinstem Eisenpulver bestreut. Bei Versuchen ohne Rotation werden die Linien durch vorsichtiges Aufklopfen mit einem leichten Stäbchen auf das Kartenblatt zur Ausbildung gebracht. Während der Rotation besorgen dies die Erschütterungen des Apparates von selbst.

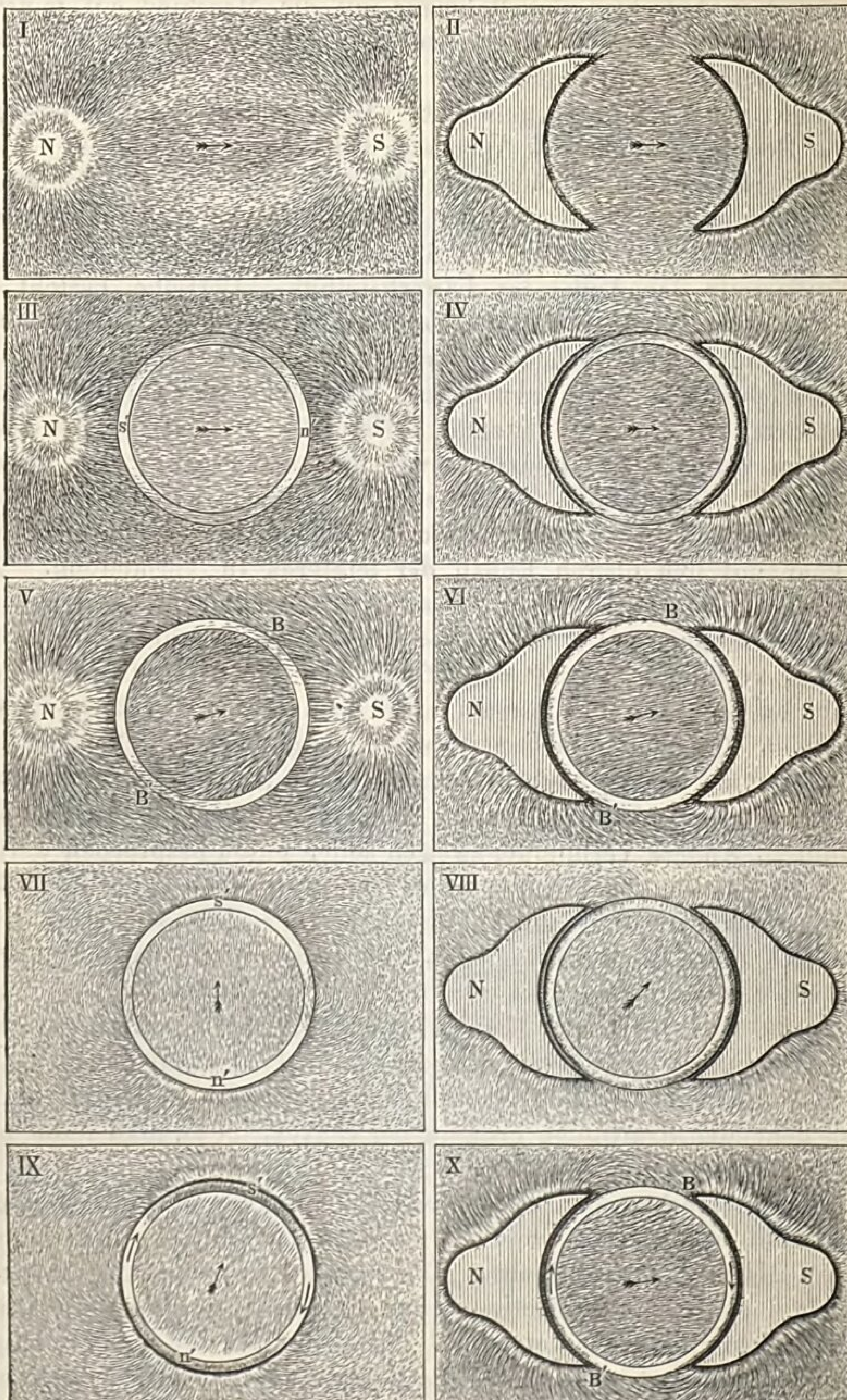
Die verschiedenen leitenden Verbindungen zwischen den Enden der Schenkelwindungen, den Enden der Ankerwindungen und der eventuell einzuschaltenden Hülfsbatterie werden durch einen Stöpselschalter an der Vorderseite des Apparates bewerkstelligt. Derselbe besteht aus sechs auf einer Platte von Hartgummi aufgeschraubten, von einander isolirten Kupferbacken, welche in zwei Verticalreihen geordnet und derart eingerichtet sind, dass jeder Backen mit seinem Nachbar durch einen eingesteckten Stöpsel in leitende Verbindung gesetzt werden kann. Ausserdem tragen das unterste, sowie das oberste Paar die Klemmschrauben P, P' und B, B'. Durch seitlich angeschraubte Drähte ist das unterste Paar mit den unteren Enden der Schenkelwindungen, das mittlere Paar mit den oberen Enden der letzteren in Verbindung. Das oberste Paar ist in derselben Weise mit den die Bürsten tragenden Armen verbunden. Um also beispielsweise die Feldmagnete allein zu laden, verbindet man P und P' mit den Polen einer Batterie und stöpselt bei d. Um die Bürsten unter sich kurz zu schliessen, stöpselt man a. Um den Inductionsstrom der magnetoelektrischen Maschine nach aussen zu leiten, benutzt man die Klemmen B und B'. Durch dieselben Klemmen kann man einen fremden Strom in die Ankerwindungen führen. Andere Verbindungsweisen sollen unten besprochen werden.

Wir beginnen unsere Versuche, indem wir die Kraftlinien herstellen, welche die Pole der Feldmagnete hervorbringen, wenn kein Anker sich zwischen ihnen befindet. Je nachdem wir dabei die cylindrischen Polenden beibehalten oder die Polschuhe aufsetzen, bekommen wir die in Fig. 661 I oder II (a. f. S.) abgebildeten Kraftliniensysteme, welche vereinfacht in Fig. 662 I und II (a. S. 775) wiedergegeben sind. Dieselben unterscheiden sich dadurch, dass im ersten Falle die von Pol zu Pol gehenden Kraftlinien nach aussen convex, im zweiten Falle nach aussen concav gekrümmt verlaufen.

Wir untersuchen nun, welche Inductionswirkung ein solches magnetisches Feld auf die rotirende Spirale ausüben würde, wenn dieselbe keinen Eisenkern enthielte. Die radialen Geraden w, q, n etc. in Fig. 662 I sollen die Projectionen von einzelnen ringförmigen Leitern auf die Zeichnungsebene vorstellen. Beginnen wir mit der Stellung w und zählen von dort nach rechts die Grade, um welche wir den Leiter gedreht haben. Im Beginn der Drehung nähert sich der Ringleiter dem

Pole *S*, gegen welchen die Kraftlinien convergiren, er wird daher in Lagen kommen, wo m e h r Kraftlinien durch seine Ebene hindurchgehen.

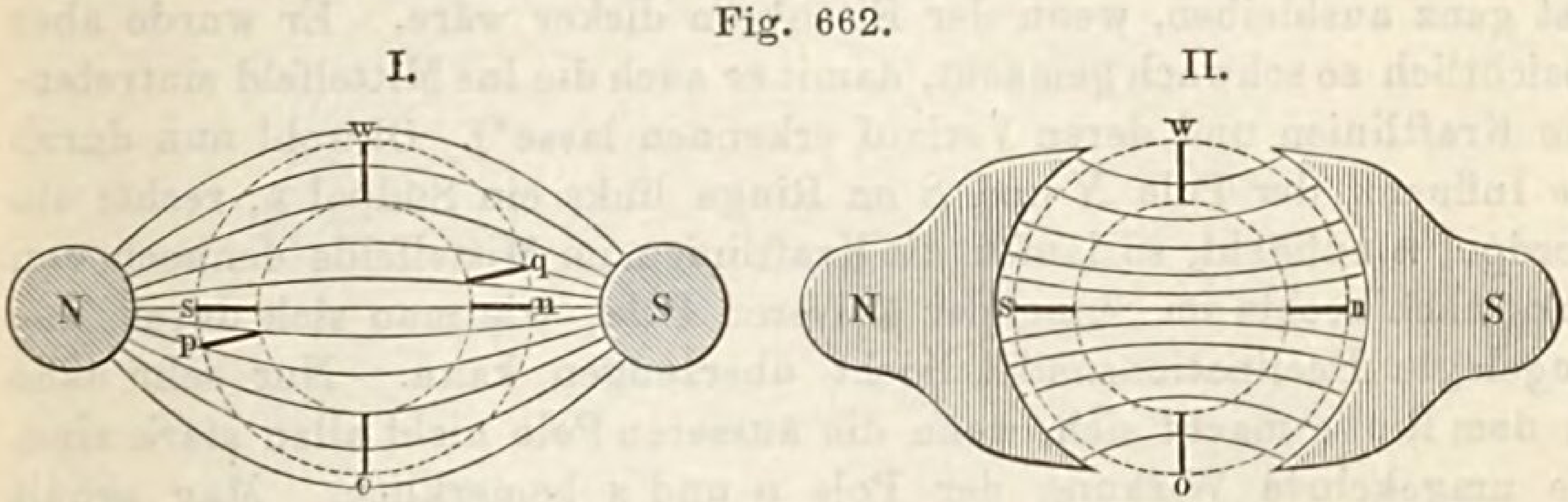
Fig. 661.



Dann aber wird er z. B. bei q durch die immer mehr auftretende Schiefstellung gegen die Kraftlinien wiederum weniger von denselben aufnehmen. Es muss daher auf dem Quadranten wn irgendwo eine Stelle geben, wo die elektromotorische Kraft die Richtung wechselt und momentan gleich Null wird. Bei einem von Isenbeck*) angestellten Versuche war dies bei 80^0 Winkelabstand von w der Fall, doch hängt dies natürlich von den Dimensionen der Apparattheile ab.

Ausserdem ist klar, dass auch in den übrigen drei Quadranten eine solche Stelle vorkommen muss; da ferner auch bei w und o ein Richtungswechsel eintritt, so erhalten wir auf eine ganze Umdrehung sechs Richtungswechsel. Einfacher stellt sich die Sache im Falle Fig. 662 II, daselbst kommen nur an den Stellen w und o Richtungswechsel vor. Auf alle Fälle kann jedoch die resultirende Stromwirkung nicht gross sein, denn diejenigen Windungen, welche gerade in der Nähe der Punkte w und o, Fig. 662 I, sich befinden, bewegen sich nahezu parallel zu den Kraftlinien,

Fig. 662.



schneiden daher nur wenige derselben. Diejenigen, welche in der Nähe der Pole sich befinden, wo die Kraftlinien am dichtesten stehen, schneiden dieselben zwar nahe senkrecht, aber sie schneiden sie zweimal mit entgegengesetzter Wirkung. Die an der Aussenhälfte jeder Windung geweckte elektromotorische Kraft wird daher grösstentheils compensirt durch die an der Innenhälfte derselben erzeugte entgegengerichtete. Die algebraische Summe der Inductionswirkungen auf eine einzelne Windung während der ganzen Rotation von w bis o ist nur eben so gross, als hätte man die Windung in w um ihren eigenen senkrecht auf die Zeichnungsebene gestellten Durchmesser gedreht. Dasselbe gilt im Falle Fig. 662 II.

Die Inductionswirkung des Magnetfeldes würde also auf diese Weise sehr schlecht ausgenutzt und man erhält daher auch nur einen schwachen Strom, wenn man auf den Apparat einen Ankerring mit einem Kern von Holz statt von Eisen aufschraubt.

Um die inducirende Wirkung des Magnetfeldes vortheilhaft auszunutzen, müssen wir vor Allem dafür sorgen, dass die Kraftlinien, welche von aussen in den Ringanker eindringen und bei der Rotation von den Aussensegmenten der Windungen durchschnitten werden, nicht mehr dazu

*) Elektrotechn. Zeitschr. IV, S. 337, 1883.

gelangen, von den Innensegmenten durchschnitten zu werden. Dies erreichen wir durch die Einlegung des Eisenkerns, dessen wesentliche Aufgabe es demnach ist, die in den Ring von den Polen her eintretenden Linien aufzunehmen, den Ringkern entlang zu leiten und dadurch die nach innen liegenden Windungssegmente vor dem Hindurchtritt der Kraftlinien zu schirmen. Wir erinnern diesbezüglich auf das Seite 95 über die Schirmwirkung des weichen Eisens Vorgetragene und verweisen ins besondere auf die Fig. 83 daselbst.

Um diese Schirmwirkung und überhaupt den Einfluss des Eisenkerns auf die Gestaltung des magnetischen Feldes zu demonstriren, setzen wir jetzt in den Apparat, Fig. 660, den Ringanker ein und rufen, ohne denselben in Rotation zu versetzen, wiederum die Kraftlinien hervor (Fig. 661 III u. IV). Dieselben treten nun ausserhalb des Ringes kräftiger als früher hervor und werden gegen denselben hin gesammelt. Innerhalb des Ringes dagegen erscheinen sie schwächer. Sie würden fast ganz ausbleiben, wenn der Eisenkern dicker wäre. Er wurde aber absichtlich so schwach gemacht, damit er auch die ins Mittelfeld eintretenden Kraftlinien und deren Verlauf erkennen lasse*). Obwohl nun durch die Influenz der Pole N und S im Ringe links ein Südpol s, rechts ein Nordpol n entsteht, so laufen die Kraftlinien im Mittelfelde dennoch von links nach rechts im Sinne der äusseren Pole, wie man sich durch eine eingelegte Declinationsnadel leicht überzeugen kann. Nur sehr nahe an dem Ringe macht sich, wenn die äusseren Pole nicht allzu stark sind, die umgekehrte Wirkung der Pole n und s bemerklich. Man erhält dann, wie die grössere Abbildung, Fig. 663, deutlicher zeigt, in der Nähe der Innenseite des Ringes zwei neutrale Stellen p und p', um welche herum die Kraftlinien radial verlaufen.

Bringt man nun bei w und o die Bürsten unter 90^0 von den Polen abstehend an, verbindet dieselben mit dem Galvanometer, so erhält man beim Drehen des Ankers einen viel stärkeren Strom als beim Ringe ohne Eisen.

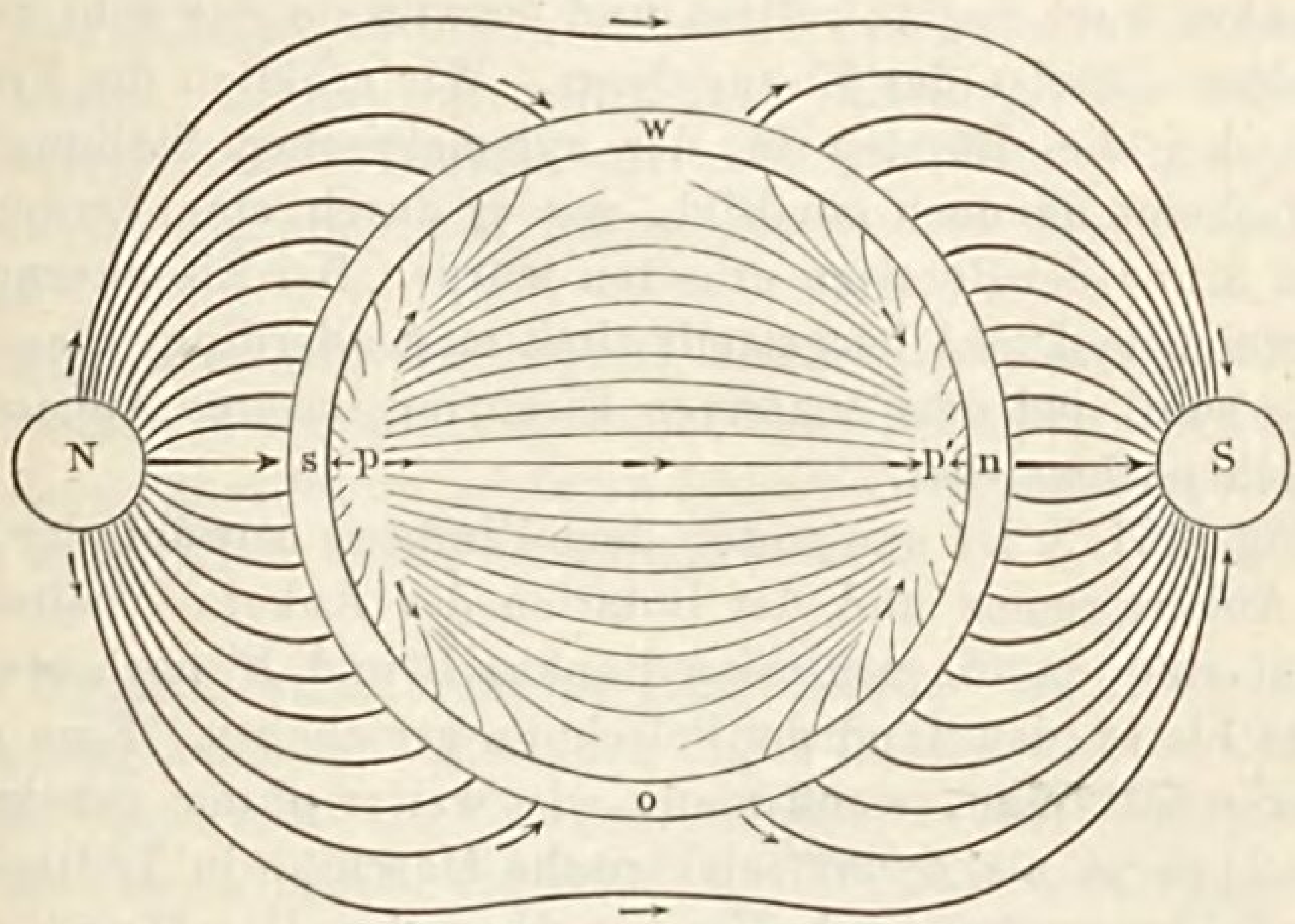
Dieser Ankerstrom wirkt nun aber selbst magnetisirend auf den Ring und verändert dadurch auch merklich die Beschaffenheit des magnetischen Feldes. Um diese Wirkung klar zu legen, denken wir uns zunächst die Feldmagnete entfernt und den Ankerstrom allein vorhanden. Der Anblick der Fig. 653 im Zusammenhange mit der Ampère'schen Regel lässt uns sofort voraussagen, dass der Ankerstrom für sich allein bei o einen Nordpol n', bei w einen Südpol s', dagegen bei n und s indifferente Stellen erzeugen würde. Die Kraftlinien, welche in Folge der magnetisirenden Wirkung des Ankerstroms von dem Eisenringe

*) Um die vollständige Schirmwirkung zu zeigen, kann man einen besonders beigegebenen dickeren, hohlen Eisencylinder aufsetzen. Derselbe eignet sich dann auch zu einer Reihe interessanter Experimente, wie sie J. Stefan in den Sitzungsber. der Wien. Akad. LXXXV, 2, S. 637, 1882, beschrieben hat.

ausgehen, müssen daher von unten nach oben, also senkrecht auf die von links nach rechts verlaufenden Kraftlinien der äusseren Pole N und S verlaufen.

Um dies experimentell zu bestätigen und überhaupt die Form des Magnetfeldes auch an der Aussenseite des Ringes kennen zu lernen, welches durch den Ankerstrom allein bei ruhendem Anker hervorgerufen würde, schalten wir am Apparate, Fig. 660, die Zuleitungsdrähte der Batterie von den Klemmen P und P' ab und verbinden dieselben mit den Klemmen B und B', d. h. wir führen den Ankerwindungen künstlich von aussen einen Strom derselben Richtung zu, wie er als Inductionsstrom beim Rotiren entstehen würde. Wir erhalten dann die Fig. 661 VII, welche das oben Gesagte bestätigt.

Fig. 663.



Es lässt sich nun schon voraussehen, was geschehen wird, wenn sowohl die Feldmagnete geladen sind als auch der Ringkern durch den Inductionsstrom beeinflusst wird. Es muss eine mittlere Richtung der Kraftlinien, so zu sagen eine Art Compromiss, resultiren zwischen den Bildern III und VII. Dies ist z. B. in den Figuren 661 V, VI und VIII der Fall. In Fig VIII haben die Feldmagnete zwar keinen Strom aber genügenden rückständigen Magnetismus behalten, um den Kraftlinien eine Richtung von ungefähr 45^0 zu geben. Sind die Feldmagnete, wie in der Praxis immer der Fall sein soll, von überwiegender Stärke, so entstehen die Bilder V respective VI. In denselben weicht die resultirende Richtung nur wenig von der Richtung NS ab.

Für die Stromwirkung ist nun vor Allem die Lage jener Kraftlinien maassgebend, welche von aussen in den Ring eindringen. Die Fig. 661 V und VI zeigen nun deutlich, dass die neutralen Stellen B und B', wo die Kraftlinien nahe parallel zur Ringperipherie verlaufen, nicht mehr wie früher in Fig. 661 III und IV oben und unten in der Mitte, sondern um einen Winkel im Sinne einer Rechtsdrehung ver-

schoben erscheinen. Man muss daher, um eine möglichst günstige Wirkung zu erhalten, die Contactbürsten an diese Stellen bringen. Daher erklärt sich also, dass in Folge der Rückwirkung des Ankerstromes und seiner magnetisirenden Einwirkung auf den Eisenkern die Bürsten in demselben Sinne verschoben werden müssen, wie die Rotation erfolgt.

Eine andere Ursache, welche ebenfalls in demselben Sinne drehend auf die günstigste Bürstenstellung einwirken kann, ist der Umstand, dass das Eisen des Ankers seinen Magnetismus nicht augenblicklich verliert, sondern eine Strecke weit mit sich schleppt. Um dies zu zeigen, stellen wir dieselben Versuchsbedingungen her, wie zur Entwickelung der Fig. 661 VII, d. h. wir lassen die Feldmagnete ungeladen, führen aber einen Strom durch die Ankerwindungen. Hierauf lassen wir den Anker nach rechts rotiren und entwickeln das Bild des magnetischen Feldes mittelst des Eisenpulvers. Wir erhalten die Fig. 661 IX. Obwohl hierbei die Bürsten in der symmetrischen Stellung belassen wurden, erscheint dennoch ein Bild, wie es durch eine Verdrehung der Bürsten im Sinne der Rotation erhalten würde. Bei Eisenkernen, welche aus ganz weichem Draht hergestellt sind, mag allerdings dieser Einfluss sehr gering sein, bei dem massiven Eisenring unseres Apparates ist er sehr deutlich nachweisbar.

Die Fig. 661 X ist nun unter dem Einflusse sowohl der Feldmagnete, des Ankerstromes und der Rotation des Ankers erhalten worden, in der That sind da die neutralen Punkte B und B' noch etwas weiter nach rechts bis an den Rand der Polschuhe verschoben. Eine ganz ähnliche Figur erhält man, wenn man, wie weiter unten gezeigt werden wird, den Apparat als dynamoelektrische Maschine in Thätigkeit setzt.

Zum Schluss möge noch Einiges über den Einfluss der Polschuhe beigefügt werden. Die Fig. 661 I bis IV lassen deutlich erkennen, dass durch die Polschuhe die Kraftlinien mehr senkrecht gegen die Ringankerperipherie gelenkt werden und es wird vielfach dieser Umstand als Aufgabe der Polschuhe bezeichnet. Dies ist aber nicht ganz richtig ausgedrückt, denn die Inductionswirkung wird nur insofern durch die senkrechte Stellung der Kraftlinien gesteigert, als dadurch die Anzahl der in derselben Zeit geschnittenen Kraftlinien gesteigert wird. Die Aufgabe der Polschuhe ist demnach nur die, dafür zu sorgen, dass möglichst viele Kraftlinien in den Ringanker hineingeführt werden und möglichst wenige daran vorbei gehen. Je breiter die eiserne Bahn ist, längs welcher Kraftlinien geführt werden, und je kürzer ferner der Weg ist, den die Kraftlinien ausserhalb des Eisens zu gehen haben, desto zahlreicher kommen dieselben zur Entwickelung. Die Polschuhe sollen daher möglichst nahe an die Windungen heranreichen und dieselben möglichst breit umfassen. Dabei muss man sich aber hüten, die Enden der entgegengesetzten Polschuhe einander zu nahe zu bringen, sonst nehmen

die Kraftlinien den Weg durch die Luft neben dem Anker vorbei. Man kann dies sehr leicht mittelst verschiedener Polschuhe an dem Apparate, Fig. 660, demonstriren.

Auch für den Ankerkern empfiehlt sich, die Dimensionen so zu wählen, dass er die übergrosse Mehrzahl der Kraftlinien längs seiner Eisenmasse gehen lässt, damit kein erheblicher Theil den kürzeren Weg quer durch das Feld einschlage. Doch wäre es schädlich, hierin zu weit zu gehen, weil dann die aufgewickelte Drahtmasse und damit der Widerstand zu gross würde, was bei gleicher elektromotorischer Kraft die Stromstärke herabsetzen müsste.

Gänzlich unrichtig ist die früher aufgetauchte Ansicht, dass es nützlich sei, der Fortpflanzung der magnetischen Wirkung von den Polen auf den Ankerkern durch eiserne Fortsätze (Zähne) des letzteren, welche zwischen den Windungen hindurch bis zu den Polschuhen reichen, Vorschub zu leisten. Damit vermehrt man allerdings die Anzahl der in den Kern eintretenden Kraftlinien, aber dieselben gehen neben den Windungen vorbei, ohne von diesen geschnitten zu werden, sind also ganz nutzlos.

Dagegen ist es sehr vortheilhaft, den Kern aus isolirten Drähten zusammenzusetzen, damit nicht ausser in den Windungen des Kupferdrahtes noch im Eisen parallel zu letzteren Inductionsströme entstehen können, welche in mehrfacher Weise schädlich wirken.

Die dynamoelektrische Maschine. Wenn wir das Schema einer magnetelektrischen Maschine, Fig. 653, bei welcher die Feldmagnete nicht permanente Stahlmagnete sind, sondern Elektromagnete, ins Auge fassen, so stellt sich die Sache so dar, dass wir, um an den Contactstellen des Commutators + *B* und — *B* einen Strom zu gewinnen, an den Enden des Drahtes der Schenkelwindungen bei *P* und *P'* einen Strom zuleiten müssen. Ausserdem haben wir noch die Arbeit aufzuwenden, welche die Drehung des Ankers erfordert. Es liegt daher der Gedanke nahe, denselben Strom, welcher im Anker durch Induction entsteht, zu benutzen, um die Feldmagnete zu laden. Es ist hierzu nur nöthig, die Bürste + *B*, Fig. 653, mit dem Drahtende *P* und die Bürste — *B* mit dem Drahtende *P'* zu verbinden. Es entsteht so ein in sich geschlossener Stromlauf, der von der positiven Bürste + *B* aus bei *P* in die Drahtumwicklung des Schenkels auf der linken Seite, dann rückwärts herüber auf den rechtsseitigen Schenkel dann bei *P'* heraus auf die negative Bürste — *B*, dann von dort in die aufsteigende Speiche der Ankerspirale geht, sich dort in zwei Zweige theilt, von denen der eine die linksseitige, der andere die rechtsseitige Hälfte der Spirale durchströmt, worauf bei *o* die Wiedervereinigung zu einem einzigen Strom stattfindet, welcher durch die dortige Speiche nach aufwärts zum Commutator und von dort zur positiven Bürste + *B* führt, womit der Kreislauf beendet ist. 206

Um an dem Apparate Fig. 660 eine derartige Schaltung auszuführen, haben wir nur nöthig, die Löcher bei *b* und *c* zu stöpseln, die übrigen Stöpsel aber zu entfernen. *P* und *P'* sind dann die Pole der Maschinen, welche durch einen Draht zu verbinden sind, worauf dann durch die Rotation des Ankers der Strom zu Stande kommt.

Merkwürdigerweise sind die Erfinder der Ringmaschine, Pacinotti und Gramme, auf diese Anordnung nicht selbst verfallen; dieser Gedanke wurde erst 1866 von W. Siemens erfasst und im Januar 1867 der Berliner Akademie mitgetheilt*). Etwas später hat dann auch Wheatstone**) denselben Gedanken ausgesprochen. Das Princip, welches in der Benutzung des Ankerstroms zum Laden der Feldmagnete beruht, heisst demnach das Siemens'sche Princip oder auch das dynamoelektrische Princip und die danach abgeänderte Maschine eine dynamoelektrische Maschine, wofür abgekürzt Dynamomaschine gebraucht wird.

Die Bezeichnungen magnetoelektrische und dynamoelektrische Maschine dürfen uns aber nicht verleiten anzunehmen, dass bei der ersteren die Elektricität aus dem Magnetismus, und nur bei der letzteren aus Arbeit (Dynamis) gewonnen werde. Bei beiden Apparaten stammt die Stromenergie aus der aufgewendeten Arbeit, beide sollten daher eigentlich dynamoelektrische Maschinen genannt werden, die angeführte Namensunterscheidung hat also keine theoretische, sondern nur noch eine conventionelle Bedeutung.

Das dynamo-elektrische Princip wurde zuerst von Siemens, Wheatstone und Ladd an Maschinen angewendet, welche auf dem Siemens'schen Inductor beruhen, bei welchem also der Magnetismus des rotirenden Eisens fortwährend wechselt und folglich der Strom, strenge genommen, kein constanter ist.

Die Anwendung des Siemens'schen Princips auf einen dynamoelektrischen Apparat mit einem Elektromagnet von constanter Polarität, bei welchem ein wirklich constanter Strom erzielt wurde, geschah, wie A. v. Waltenhofen***) nachgewiesen hat, zuerst im Februar 1870 mittelst des Kravogl'schen elektromagnetischen Motors (s. S. 720) durch den Verfasser dieses Lehrbuchs, nachdem derselbe schon 1867 die Möglichkeit der Anwendung des Siemens'schen Princips auf diesen Apparat ausgesprochen hatte.

Im Juli 1871 erfolgte dann die Anwendung des Siemens'schen Princips auf die Maschine von Gramme†).

Der Grund, warum die Entdecker der Ringmaschine nicht den Ankerstrom zum Magnetisiren der Feldmagnete zu verwenden suchten,

*) Monatsber. d. Berlin. Akad. vom 17. Januar 1867.

**) Proc. Roy. Soc. 14. Febr. 1867.

***) Zeitschr. f. Elektrotechnik 1, S. 26, 1883.

†) Comptes rendus, Bd. 73, S. 144, 175.

mag wohl ein Einwand gewesen sein, der eine solche Anwendung auf den ersten Blick unausführbar erscheinen lässt. Um den Strom zu erzeugen, braucht man ja vorher die Feldmagnete; um diese zu erzeugen, den Strom. Es erscheint daher nicht möglich, diese beiden Agentien zugleich zu gewinnen. Dass es dennoch möglich ist, beruht auf Folgendem. Jedes Eisen enthält eine Spur Magnetismus schon in Folge der Einwirkung des Erdmagnetismus. Insbesondere aber bleibt in allen Elektromagneten nach dem Aufhören des Stromes noch Magnetismus zurück. Die Schenkel einer dynamoelektrischen Maschine haben also mindestens eine Spur von Magnetismus, welcher hinreicht, durch Rotation des Ankers einen im Anfange allerdings schwachen Strom zu entwickeln. Dieser steigert aber sofort den Magnetismus; der gesteigerte Magnetismus giebt aber wiederum einen stärkeren Strom und so steigern sich diese Agentien gegenseitig immer höher hinauf, bis endlich die Steigerung des Magnetismus eine Grenze findet. Von nun an kann ein Theil des Stroms, oder ein Theil der Stromenergie, nach aussen Verwendung finden, wenn nur so viel Strom oder Stromenergie verfügbar bleibt, welche benöthigt wird, um die Feldmagnete genügend magnetisch zu erhalten.

Wenn man eine dynamoelektrische Maschine bei offenem Schliessungskreise in Bewegung setzt, so hat man, da kein Strom entstehen kann, auch keine andere Arbeit zu leisten, als zur Ueberwindung der Reibung nöthig ist. Die Maschine geht also leicht. Sobald man aber den Stromkreis schliesst, erwacht sofort ein rasch grösser werdender Widerstand und der Strom nimmt rasch an Stärke bis zum Maximum zu. Man sagt „die Maschine gehe an“ und wenn sie angegangen, dann geht sie schwer und zwar um so schwerer, je geringer der Widerstand des äusseren Stromkreises ist, weil dann um so mehr Stromenergie zur Magnetisirung der Feldmagnete verwendet wird und die zu überwindende Gegenkraft des Stroms desto grösser wird.

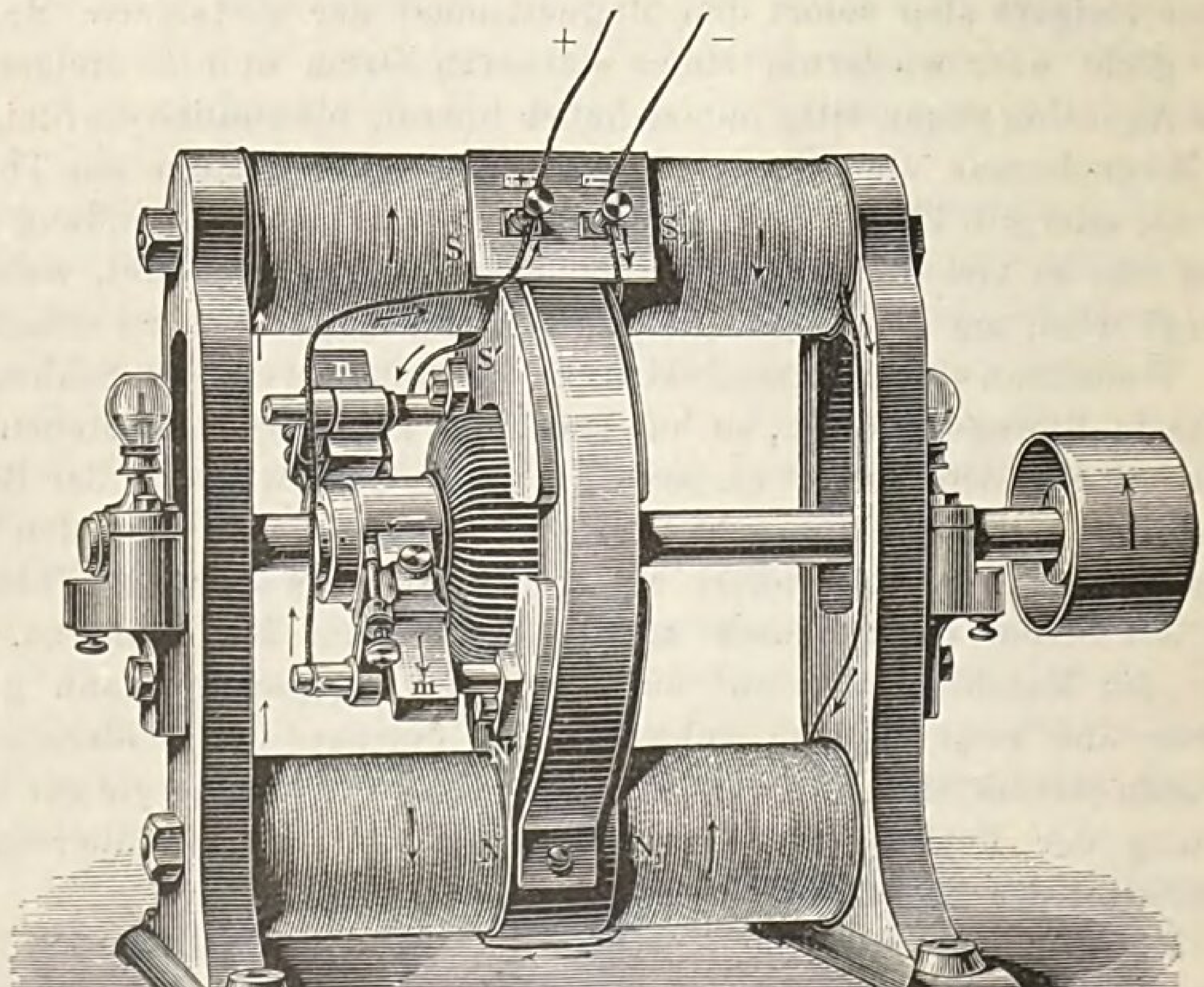
Die dynamoelektrische Maschine hat in der Zeit seit 1871 einen grossartigen Aufschwung der technischen Anwendung des elektrischen Stromes ermöglicht. Die Maschine selbst hat hierbei, ähnlich wie die Dampfmaschine, immer grössere Vervollkommnung erfahren. Sehen wir von den später zu besprechenden Wechselstrommaschinen ab, so ist das Princip derselben im Wesentlichen immer dasselbe geblieben. Alle Dynamomaschinen besitzen daher irgendwie geformte Feldmagnete, einen Inductor (Ringanker oder Trommelanker; denn auch auf die v. Hefner-Alteneck'sche Trommelmaschine wurde das Siemens'sche Princip angewendet), einen Collector (Commutator), Contactbürsten und die nöthigen Verbindungen. Wegen der Details dieser Maschinen müssen wir unbedingt auf Specialwerke*) verweisen; hier wollen wir nur einige Haupttypen abbilden und beschreiben.

*) Z. B. das „Handbuch d. Elektrotechnik von Dr. Erasmus Kittler“, Stuttgart 1886; Schellen, die magneto- und dynamoelektrischen Maschinen.

Fig. 664 zeigt eine Gramme'sche dynamoelektrische Maschine in der von S. Schuckert in Nürnberg ausgeführten Form (Flachringmaschine) in perspectivischer Zeichnung, Fig. 665 dieselbe im Längsschnitt, Fig. 666 im Querschnitt nach *ab*.

Gegenüber den Figuren 653 und 660 ist die Anordnung hier um 90° verdreht, indem die Pole des (doppelt vorhandenen) Elektromagnets statt im horizontalen Durchmesser im verticalen angebracht sind, weshalb auch die Auflagestellen der Stromableiter *m*, *n* nicht oben und unten, sondern links und rechts erscheinen. Ausserdem ist die Rotationsrichtung die umgekehrte.

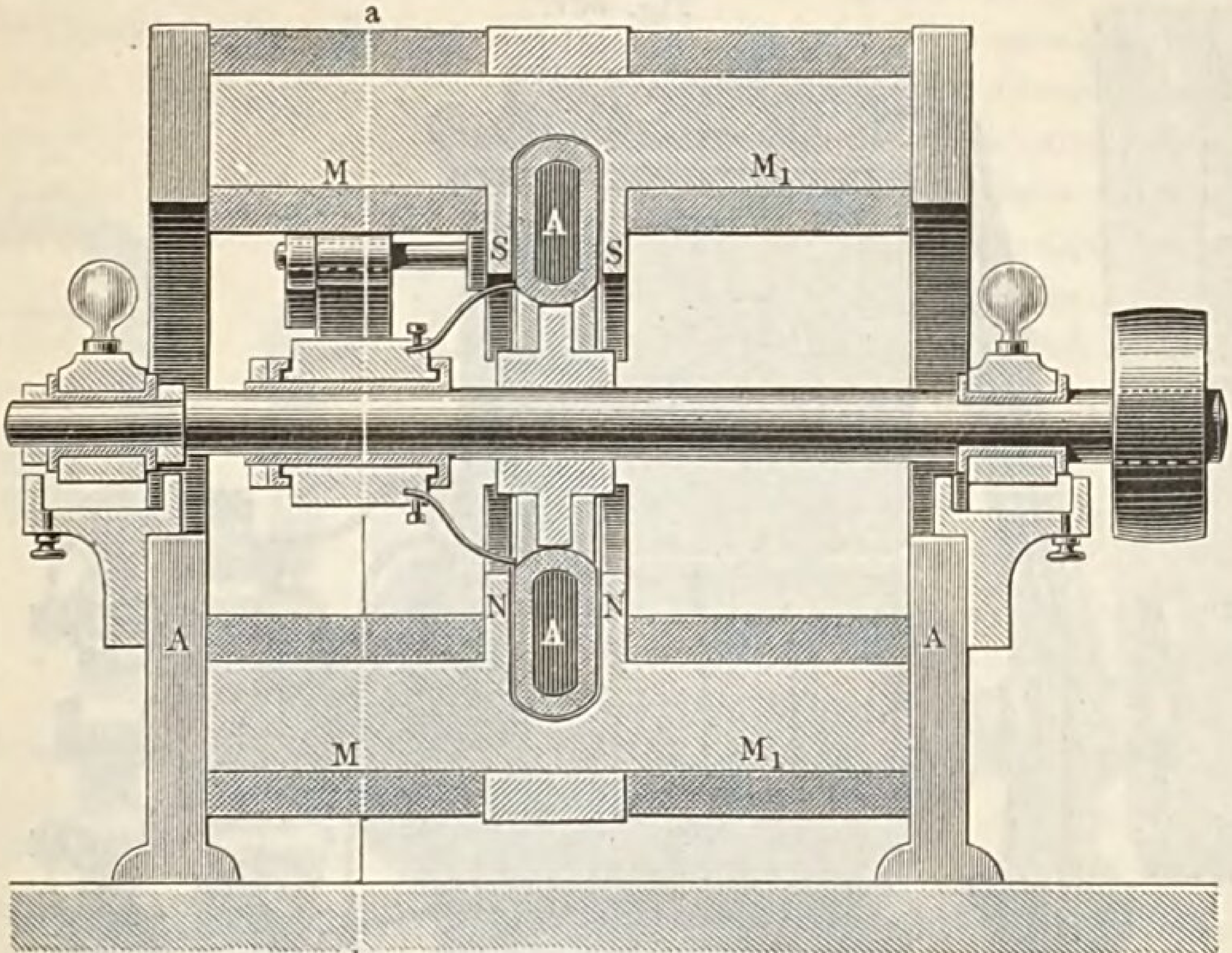
Fig. 664.



Der positive Strom geht von der mit — bezeichneten Klemmschraube zuerst auf das Gewinde, welches den Südpol S_1 erzeugt, dann hinunter zum Schenkel mit dem Pole N_1, dann querüber zum Schenkel mit dem Pole N des anderen Elektromagnets, dann längs des in der Figur verdeckten Drahtes hinauf zum Schenkel mit dem Pole S, von dort rückwärts hinab zum Stromableiter n, von diesem auf dem Collector längs der Axe in den Ring hinein, an der Vorderseite der Axe wieder heraus auf den Stromleiter m und von dort zur Klemmschraube +, welche als positiver Pol der Maschine fungirt. S' und N' sind eiserne Fortsätze der Pole S, S und N, N, die den Ring bogenförmig oben und unten umfassen. Der Längsschnitt ist hiernach von selbst verständlich, er zeigt, dass der Eisenkern des Ringes aus gegenseitig isolirten Eisenblechstücken

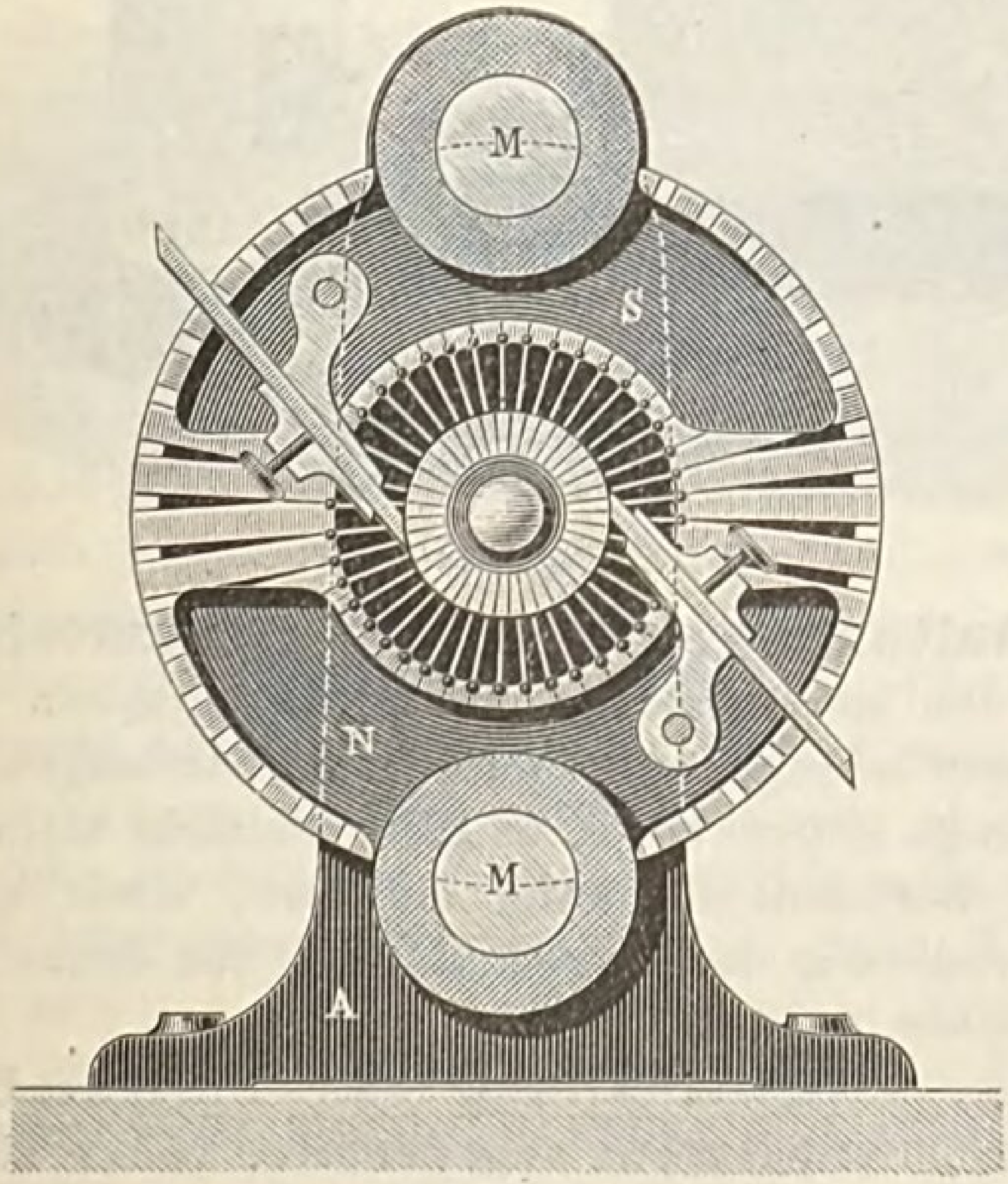
zusammengesetzt und nicht runden Querschnitts, sondern als plattgedrückter Ring construirt ist, welcher von aussen und von seitwärts der In-

Fig. 665.



fluenz der umgebenden Pole ausgesetzt erscheint, was für die grössere Ausnutzung der Drahtwindungen nur vortheilhaft sein kann.

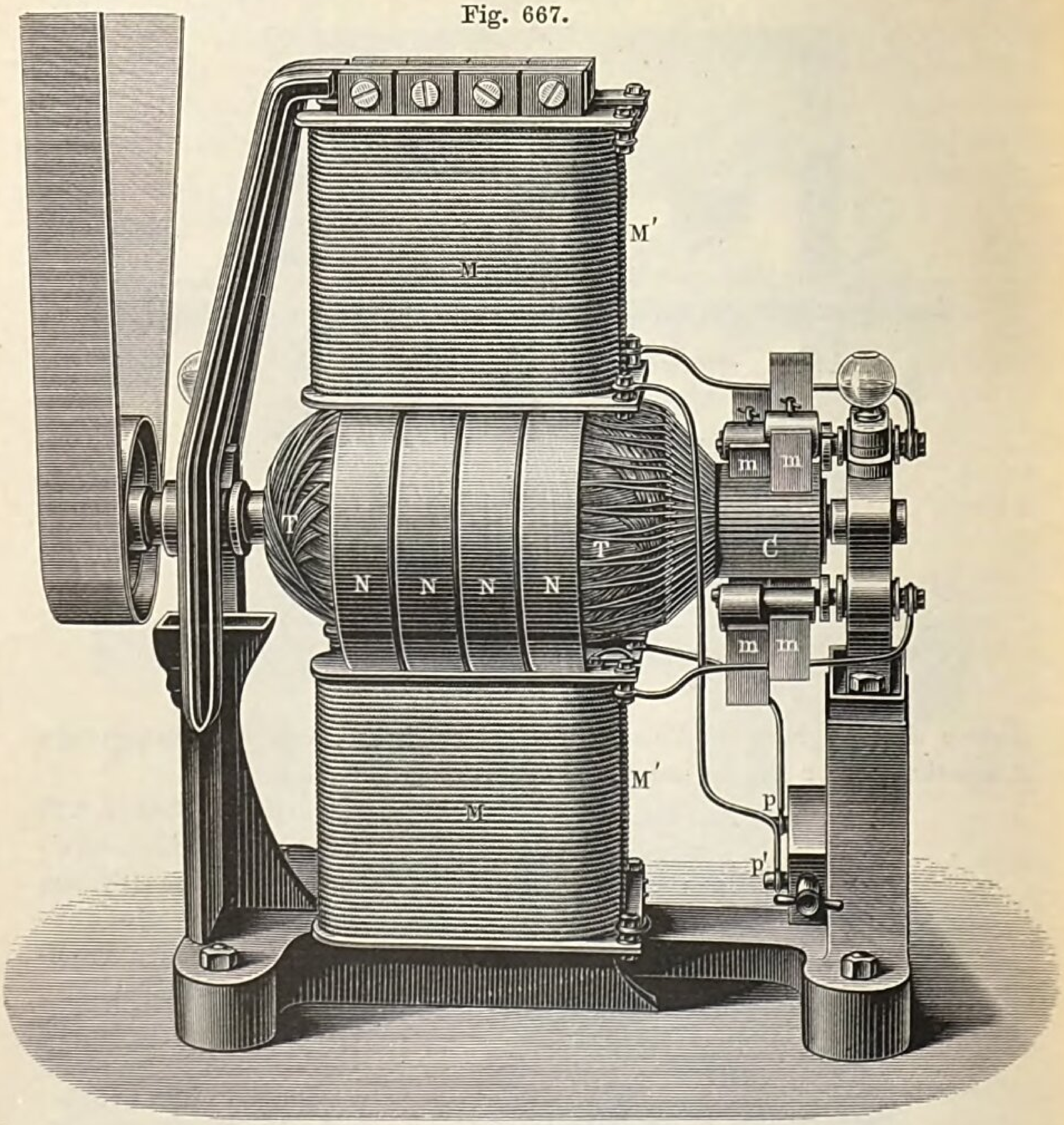
Fig. 666.



Die Fig. 667 (a. f. S) zeigt eine Siemens'sche Maschine (System D_7) mit v. Hefner-Alteneck'scher Trommel in perspectivischer Seitenansicht. Die Drahtwindungen M, M erzeugen die Nordpole N, N, N, N, die rückwärts stehenden, wenig sichtbaren Drahtwindungen M', M' erzeugen die entsprechenden (nicht sichtbaren) Südpole. TT ist die rotirende Trommel, C ist die Axe mit den eingelegten Stromleitern, auf welchen die

Contactbürsten m, m streifen, p und p' sind die Polschrauben. Aehnliche Maschinen sind noch von Lontin, Bürgin, Wallace-Farmer u. A. construirt. Etwas abweichend ist die Construction der Maschine von **Brush**.

Fig. 667.



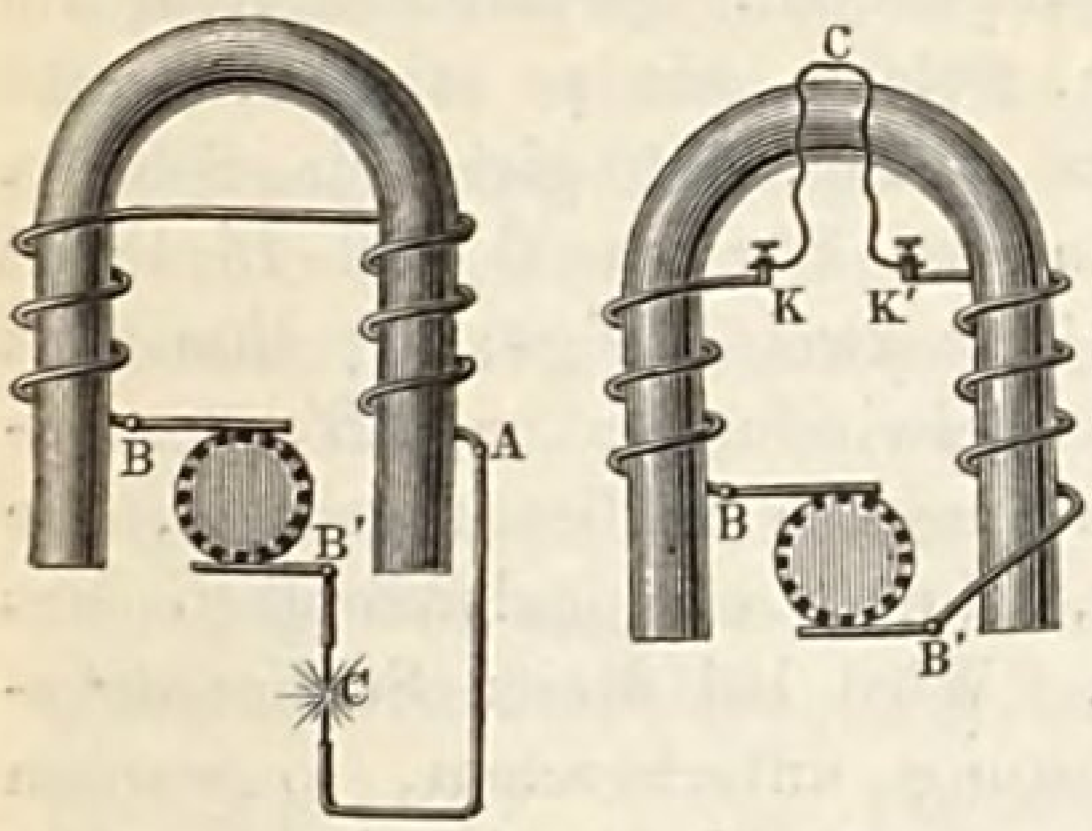
207 **Verschiedene Schaltungsweisen an der dynamoelektrischen Maschine.** Die im vorangegangenen Paragraphen beschriebene Weise, die Ankerwindungen mit den Schenkelwindungen zu verbinden, ist nicht die einzige angewendete, es giebt vielmehr mehrere Verbindungsweisen dieser Bestandtheile unter einander, sowie auch mehrere Methoden der Bewickelung der Magnetschenkel, von denen wir die wichtigeren hier besprechen wollen.

I. Normalschaltung, Hauptschaltung oder Serienschaltung nennt man die zuerst von Siemens angewendete, bisher allein

erwähnte Schaltungsweise, wobei der aus dem Anker kommende Strom ungetheilt die Schenkelwindungen durchfliesst. Die Fig. 668 zeigt diese Schaltungsweise in den beiden Modificationen a. und b., welche sich nicht wesentlich unterscheiden. Entweder geht der Strom, wie in Fig. 668 a., von einer Bürste B zuerst durch beide Schenkelwicklungen und dann durch die äussere Leitung ACB', welche die Nutzleitung genannt wird, zur anderen Bürste B', oder die Nutzleitung wird, wie in Fig. 668 b. angedeutet ist, zwischen die Schenkelwindungen bei K und K' eingeschaltet. In dem ersteren Falle sind A und B', im zweiten Falle K und K' die Pole der Maschine.

Fig. 668.

a. b.



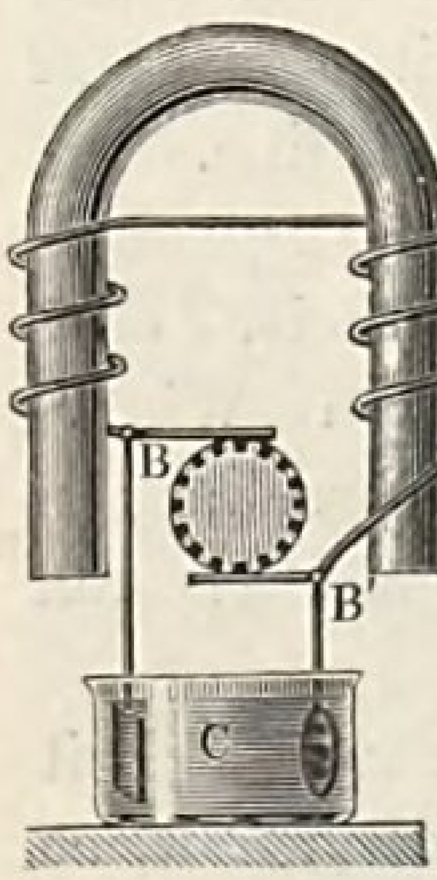
Die so geschaltete Dynamomaschine hat den Nachtheil, dass Aenderungen im äusseren Widerstande oder gar Unterbrechungen des Stroms viel störender wirken, als dies bei einer magnetelektrischen Maschine der Fall sein kann.

Während letztere bei constanter Umdrehungsgeschwindigkeit (Tourenzahl) auch eine constante elektromotorische Kraft entwickelt, so dass bei Aenderungen des äusseren Widerstandes sich die Stromstärke nach dem Ohm'schen Gesetze ändert, ist dies bei der normal geschalteten dynamoelektrischen Maschine nicht der Fall. Steigt z. B. in Folge Einschaltung eines äusseren Widerstandes der Gesammtwiderstand auf das Doppelte, so wird hierdurch auch die elektromotorische Kraft vermindert, weil die verminderte Stromstärke auch die Feldmagnete schwächer magnetisirt, also die Intensität des magnetischen Feldes abnimmt. Die Abnahme der Stromstärke ist daher viel bedeutender als bis auf die Hälfte; denn wenn auch zunächst in Folge der Verdopplung des Widerstandes die Stromstärke nach dem Ohm'schen Gesetze auf die Hälfte sinkt, so sinkt sie dann in Folge der Abnahme der elektromotorischen Kraft noch weiter. Unterbrechungen im Stromkreise lassen die Feldmagnete ihren Magnetismus fast ganz verlieren und es braucht daher immer eine gewisse Zeit, bis nach Aufhebung der Unterbrechung der Strom wieder ansteigt und die ursprüngliche Stärke erhält. Benutzt man den Strom der Dynamomaschine zur Elektrolyse, zur Galvanoplastik oder zum Laden von Accumulatoren und unterbricht auch nur auf einen Augenblick die Rotation des Ankers, so verlieren die Feldmagnete nicht allein sofort ihren Magnetismus, sondern sie werden durch den entgegengesetzten Polarisationsstrom entgegengesetzt magnetisirt. Beim Wiederbeginn der Rotation wird in Folge dessen die Maschine ihre Pole gewechselt haben, was, wenn es übersehen wird, oft von misslichen Folgen begleitet sein kann. Es wäre daher in solchen Fällen vortheilhaft, die Maschine als eine

magnetoelektrische zu benutzen. Dies könnte geschehen, indem man ihre Feldmagnete constant durch einen fremden Strom einer Batterie oder einer kleineren magnetoelektrischen Maschine im selben Sinne magnetisch erhält, eine Methode, welche oft und mit Erfolg angewendet wurde. Man erreicht jedoch bis zu einem gewissen Grade denselben Zweck, indem man den aus dem Anker kommenden Strom theilt, den einen Antheil allein zur Magnetisirung der Feldmagnete, den anderen Theil allein zur äusseren Stromwirkung verwendet. Dadurch entsteht die

II. Nebenschlussschaltung, welche, wie es scheint, zuerst Wheatstone 1867 vorgeschlagen hat. Fig. 669 giebt ein Schema dieser Schaltung. An den Bürsten B und B' theilt sich die Stromleitung je in zwei Zweige; der eine geht von B durch die Schenkelwindungen nach B', der andere von B durch den äusseren Schliessungskreis, die Nutzleitung z. B., durch ein galvanoplastisches Bad C zur Bürste B'. Wird bei dieser Schliessungsweise die äussere Leitung unterbrochen, so werden die Feldmagnete nicht unmagnetisch, sie werden vielmehr noch stärker magnetisirt, da nun der ganze Ankerstrom durch die Schenkelwindungen geht. Die Maschine bleibt daher bereit, im Augenblicke, wo der äussere Kreis wieder geschlossen wird, sofort wiederum zu wirken.

Fig. 669.



Wird zwischen den Drähten der Nutzleitung ein sogenannter Kurzschluss hergestellt, was manchmal ohne Absicht durch Zufall geschehen kann, so wird die Maschine stromlos, weil sofort nur ein verschwindend kleiner Stromtheil durch die Schenkelwindungen geht, in Folge dessen diese unmagnetisch werden. Es ist dies ein Vortheil gegenüber der Normalschaltung, bei welcher in Folge zufälligen Kurzschlusses die Drahtwindungen einen allzu starken Strom erhalten und dadurch eine schädliche Ueberhitzung erleiden können. Auch gegen Aenderungen im äusseren Widerstande ist die so geschaltete Maschine weniger empfindlich, denn, steigt der äussere Widerstand, so würde bei gleichbleibender elektromotorischer Kraft der Strom nur nach dem Ohm'schen Gesetze abnehmen, da aber dann sofort ein grösserer Stromantheil durch die Schenkelwindungen geht, so wird in Folge stärkeren Magnetismus auch die elektromotorische Kraft und damit die Stromstärke wieder etwas erhöht; die letztere wird also jedenfalls in geringerem Verhältnisse geschwächt, als der Widerstand erhöht wird. Endlich ist bei dieser Schaltung beim Stillstehen der Maschine ein Polwechsel in Folge eines Polarisationsstromes ausgeschlossen, da die Feldmagnete, wie leicht zu übersehen ist, durch einen solchen Strom in derselben Richtung umflossen werden, wie durch den ursprünglichen Strom. Die Nebenschlussschaltung wird aus den angegebenen Gründen zur Edison'schen Glühlichtbeleuchtung und zu galvanoplastischen wie

elektrolytischen Arbeiten, wie überall dort angewendet, wo öftere Stromunterbrechungen oder Widerstandsänderungen vorkommen, während die Normalschaltung insbesondere zur Bogenlichtbeleuchtung und überall dort angewendet wird, wo in der Stromleitung der Widerstand immer derselbe bleibt.

III. Die Compoundschaltung, Ausgleichsschaltung oder Schaltung mit gemischter Bewickelung der Feldmagnete wurde 1879 von Brush angewendet, wie es scheint, zunächst nur zu dem Zwecke, Polwechsel zu verhindern. Erst später wurde erkannt, dass eine solche Schaltung dazu dienen kann, die Klemmspannung der Maschine vom äusseren Widerstande innerhalb weiter Grenzen unabhängig zu machen (Maschinen mit constanter Spannung). Die Compoundschaltung strebt also denselben Zweck an, wie die Nebenschlussschaltung, aber mit viel vollkommenerem Erfolge.

Fig. 670 zeigt diese Schaltungs- und Wicklungsweise. Man denke sich die Normalschaltung, Fig. 668a., und ausserdem von B aus noch einen dünnen Draht in vielen Windungen neben den Hauptdraht auf die Schenkel aufgewickelt, welcher bei B' zur anderen Bürste führt. Die Figur deutet an, dass die Maschine dazu dienen soll, eine Anzahl Vacuumglühlampen l, l, welche parallel in die Nutzleitung zwischen A und B' geschaltet sind, zu speisen. Damit diese Lampen gleich stark glühend bleiben, muss die Potentialdifferenz auf den beiden Hauptdrähten constant dieselbe bleiben. Wird nun eine Anzahl dieser Lampen ausgeschaltet, so vergrössert sich der Widerstand. Hätten wir die Normalschaltung, so würde in Folge dessen der Strom abnehmen und zwar einmal nach dem Ohm'schen Gesetze, dann noch einmal in Folge des schwächer werdenden Magnetismus; dadurch wird aber auch die Potentialdifferenz verringert und die eingeschaltet gebliebenen Lampen werden weniger stark, vielleicht gar nicht mehr leuchten. Haben wir aber die Compoundschaltung, so wird durch die Vermehrung des äusseren Widerstandes ein grösserer Stromantheil in die dünne Drahtumwickelung getrieben und durch diese auf den Magnetismus steigernd eingewirkt. Bei passender Wahl der Widerstände und der Windungszahl gelingt es, diese letztere Steigerung gerade so gross zu machen, dass dadurch die Verminderung der Potentialdifferenz eben compensirt wird.

Fig. 670.

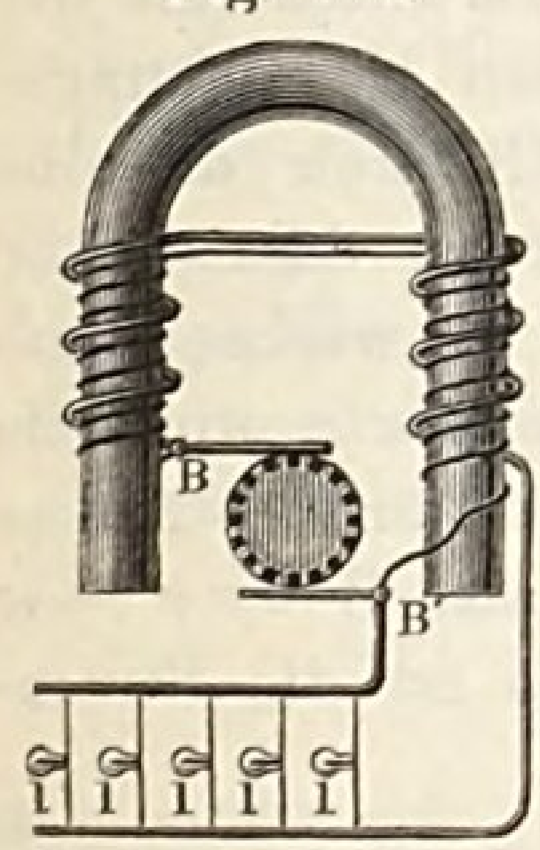
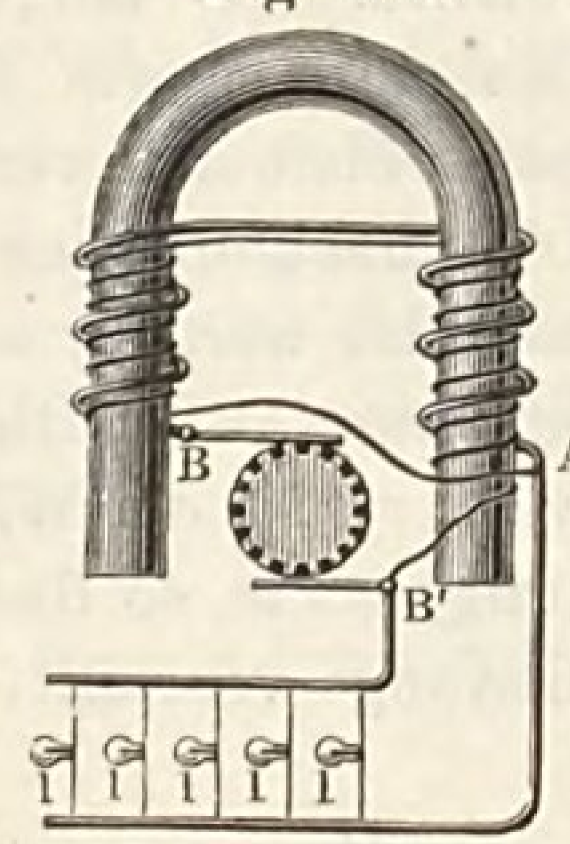


Fig. 671.



Die in Fig. 671 skizzirte, von Silvanus Tompson angegebene Schaltungsweise unterscheidet sich nur unbedeutend von der vorigen. Die Enden des dünnen Nebendrahtes sind statt mit B und B' mit A und B' verbunden, was zur Folge hat, dass der durch den dünnen Draht

gehende Strom auch noch die dickdrahtigen Windungen durchfliessen muss.

Ausser diesen Schaltungsweisen giebt es noch solche, welche nicht die Erhaltung gleicher Spannung, sondern die gleicher Stromstärke bezwecken, welche aber weniger Anwendung gefunden haben.

Um bei den beiden erst beschriebenen Schaltungen, Fig. 668 und 669, die Stromstärke, respective Spannung zu reguliren, schaltet man in den Stromkreis (bei der Nebenschlussschaltung in die Schenkelleitung) einen Rheostaten ein, der dann Regulator heisst.

In welcher Weise der äussere Widerstand auf Stromstärke, elektromotorische Kraft und Klemmspannung einwirkt, wollen wir im nächsten Paragraphen zeigen.

208 Elektromotorische Kraft, Klemmenspannung, Nutzeffect und Wirkungsgrad der magnetoelektrischen und Dynamomaschinen.

I. Magnetelektrische Maschine. So lange die Intensität des magnetischen Feldes einer solchen Maschine sowie deren Umdrehungsgeschwindigkeit (Tourenzahl) constant bleiben, verhält sich dieselbe ganz analog wie ein galvanisches Element und es kann daher ohne Weiteres das Ohm'sche Gesetz angewendet werden, um bei wechselndem Widerstande die Stromstärke zu berechnen. Ist die elektromotorische Kraft, welche im Anker entwickelt wird, $= E$, der Widerstand im Anker $= r$, im Schliessungskreise (Nutzleitung) $= w$, so dass also $W = r + w$ den Gesammtwiderstand der Stromleitung vorstellt, so ist die Stromstärke J gegeben durch

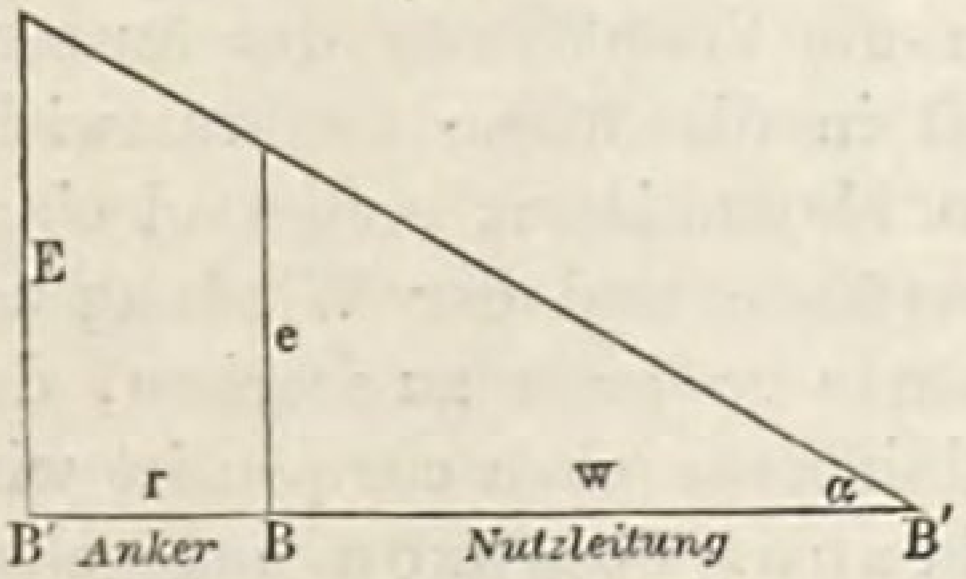
$$J = \frac{E}{W} = \frac{E}{w + r},$$

woraus folgt:

Elektromotorische Kraft $E = J(w + r) = Jw + Jr.$

Die Grösse Jw ist aber gleich der Potentialdifferenz an den Polen (Klemmen) der Maschine und wird gewöhnlich die Klemmenspannung (abgekürzt: Klemmspannung) genannt; wir wollen sie mit e bezeichnen. Die Differenz $E - e = Jr$ stellt mithin den Spannungsverlust dar, den der Strom durch den Widerstand des Ankers erleidet. Die Fig. 672 stellt den Zusammenhang dieser Grössen graphisch dar. Die Abscissen entsprechen den Widerständen, die Ordinaten den Potentialhöhen, die trigonometrische Tangente von α der Stromstärke. Da E constant bleibt, so muss, wenn die Nutzleitung w verlängert wird, e zunehmen und α ab-

Fig. 672.



nehmen. Mit wachsendem Widerstande der Nutzleitung wächst also die Klemmspannung und nimmt der Strom ab, ganz wie bei einem galvanischen Elemente. Wird $w = 0$, so wird $e = 0$, J erhält den Maximalwerth $\frac{E}{r}$, wird $w = \infty$, so wird $e = E$, $J =$ Null. Das erstere entspricht dem „Kurzschluss", das letztere der Unterbrechung der Stromleitung der Maschine.

Aendert sich die Tourenzahl der Maschine, so steigt die elektromotorische Kraft nahe im Verhältniss zur Tourenzahl. Da nämlich der Ankerstrom und der Ankermagnetismus, wie wir oben gezeigt, auf das Magnetfeld schwächend einwirkt, so steigt die elektromotorische Kraft meist etwas langsamer als die Tourenzahl, ein Umstand, der sich um so mehr geltend macht, je schwächer die Feldmagnete im Verhältniss zum Anker sind. Aus dieser Rückwirkung des Ankerstromes auf das Magnetfeld folgt ferner, dass das Ohm'sche Gesetz für die Maschine nicht ganz genau zur Anwendung kommen kann, da die elektromotorische Kraft bei stärkerem Strome etwas abnehmen muss, wie es analog auch bei den galvanischen Elementen durch die Polarisation der Fall ist.

Unter dem Nutzeffect der Maschine versteht man den Effect des Stromes in der Nutzleitung. Derselbe berechnet sich nach §. 148 als das Product aus der Potentialdifferenz an den Enden und der Stromstärke, und wird nach Voltampère (Watt) gemessen*). Wir haben demnach diesen Nutzeffect

$$v = eJ = wJ^2 = \frac{e^2}{w} \text{ Voltamp.}$$

äquivalent mit

$$eJ \text{ Watt} = \frac{eJ}{9,81} \frac{\text{Kilogr.-Meter}}{\text{Secunde}} = \frac{eJ}{736} \text{ Pferde},$$

substituirt man für J^2 seinen Werth

$$\frac{E^2}{(w + r)^2},$$

so erhält man für den Nutzeffect den Ausdruck:

$$v = E^2 \frac{w}{(w + r)^2}.$$

Dieser erhält seinen grössten Werth, wenn $w = r$ wird, also dann, wenn der äussere Schliessungskreis der Maschine denselben Widerstand hat wie der Anker.

*) Voltampère und Watt sind äquivalent aber nicht identisch; Voltampère ist das Maass des elektrischen, Watt das Maass des mechanischen Effects, der aus dem elektrischen entstehen oder in letzteren umgewandelt werden kann. Doch wird dieser Unterschied meist unbeachtet gelassen.

Unter dem elektrischen Wirkungsgrad γ oder dem Güteverhältniss der Maschine versteht man das Verhältniss des Nutzeffectes v zum Totaleffect τ des Stromes. Der letztere ist gegeben durch:

$$\tau = EJ = J^2 (r + w) = \frac{E^2}{r + w}$$

Man findet daher den elektrischen Wirkungsgrad:

$$\gamma = \frac{v}{\tau} = \frac{e}{E} = \frac{w}{r + w};$$

(derselbe wird auch oft nach Procenten 100γ angegeben); für $r = w$ wird $\gamma = 1/2$. Der Wirkungsgrad ist um so grösser, je kleiner r gegen w ist. Sein Maximalwerth ist 1.

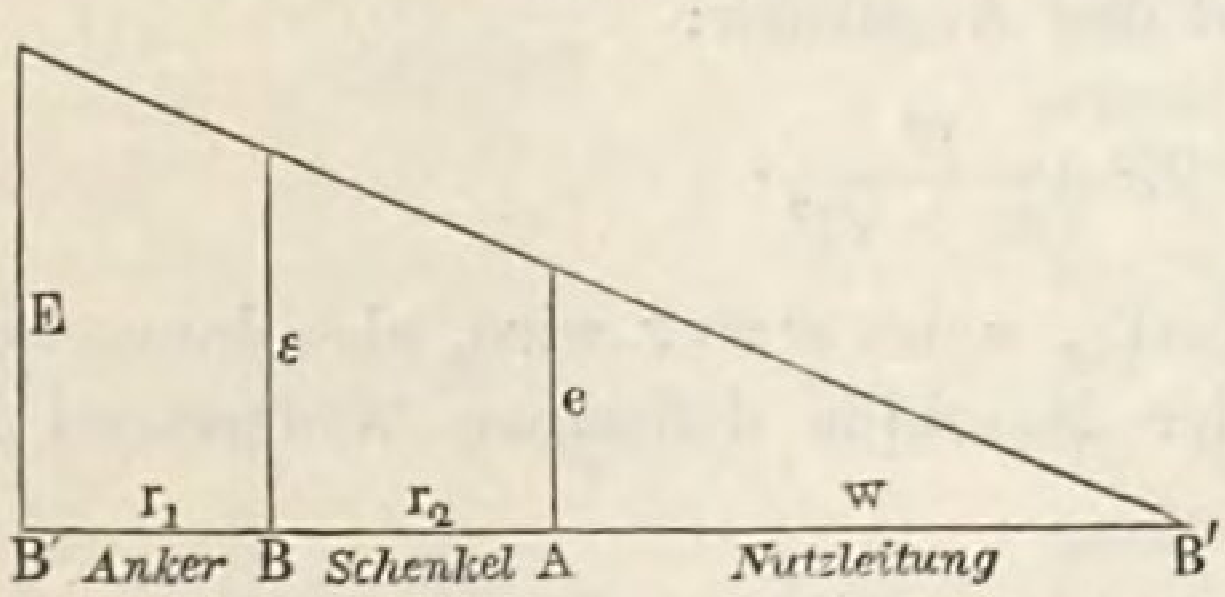
II. Dynamoelektrische Maschine mit Normalschaltung (vergl. Fig. 668). Es sollen dieselben Bezeichnungen gelten wie oben; nur zerfällt der Widerstand r der Maschine zwischen den Polklemmen in zwei Theile, nämlich in den Widerstand r_1 des Ankers und den Widerstand r_2 der Schenkelwindungen, so dass also $r = r_1 + r_2$ ist. Ausser der Klemmspannung e, welche der Potentialdifferenz an den Punkten A und B' (Fig 668 a.) oder an den Punkten K und K' (Fig. 668 b.) entspricht, kommt hier noch die Potentialdifferenz an den beiden Bürsten B und B' in Betracht, welche wir mit ε bezeichnen wollen. Man hat dann wie oben die Beziehungen:

$$e = Jw,$$
$$E = J(r_1 + r_2 + w) = Jr + e,$$
$$\varepsilon = J(r_2 + w).$$

Die Fig. 673 stellt das Potentialdiagramm dar.

Während nun aber bei der magnetelektrischen Maschine bei constanter Tourenzahl die Grösse E eine vom äusseren Widerstande (nahe) unabhängige Constante darstellte, ist dies bei der dynamoelektrischen Maschine nicht mehr der Fall, denn sobald mit der Vergrösserung von w der Werth von J sinkt, wird auch der Magnetismus schwächer und sinkt auf E. Auch kann hier die elektromotorische Kraft E nicht proportional mit der Tourenzahl zunehmen, sie muss vielmehr rascher steigen, denn da durch die Steigerung der Tourenzahl die Stromstärke und hierdurch auch das Magnetfeld verstärkt wird, so werden die Kraftlinien desselben nicht bloss häufiger durchschnitten, sondern es wird auch die Anzahl derselben vermehrt. Wir kommen hierauf später zurück.

Fig. 673.



Aus dem angegebenen Grunde gilt hier auch nicht mehr die bei der magnetelektrischen Maschine angegebene Beziehung zwischen dem inneren und äusseren Widerstande im Falle des maximalen Nutzeffects. Dagegen erhält man für den Nutzeffect und den elektrischen Wirkungsgrad dieselben Ausdrücke:

Nutzeffect $v = eJ = wJ^2$,

Totaleffect $\tau = EJ = (r_1 + r_2 + w)\, J^2$,

Elektrischer Wirkungsgrad $\gamma = \frac{e}{E} = \frac{w}{r_1 + r_2 + w}$.

III. Dynamomaschine mit Nebenschlussschaltung (vergl. Fig. 669). Bezeichnen wir den Widerstand und die Stromstärke
im Anker*) mit r_1 und i_1,
in den Schenkelwindungen mit r_2 und i_2,
in der Nutzleitung mit w und J.

Da die Widerstände r_2 und w zwischen ihren Endpunkten parallel geschaltet sind, so berechnet sich ihr gemeinsamer Widerstand nach §. 137 8) $= \frac{r_2 w}{r_2 + w}$, somit ergeben sich folgende Beziehungen:

$$i_1 = J + i_2,$$

$$E = i_1 \left[r_1 + \frac{r_2 w}{r_2 + w}\right],$$

$$e = wJ = i_2 r_2,$$

Nutzeffect . . . $v = eJ = wJ^2$,

Totaleffect . . $\tau = r_1 i_1^2 + r_2 i_2^2 + wJ^2$,

Wirkungsgrad $\gamma = \frac{wJ^2}{r_1 i_1^2 + r_2 i_2^2 + wJ^2}$.

Um γ durch die Widerstände allein auszudrücken beachte man zunächst, dass nach den Gesetzen der Stromtheilung

$$i_2 : J = w : r_2,$$

also auch

$$i_2 + J : J = w + r_2 : r_2;$$

aus der ersten Proportion folgt:

$$i_2 = J\,\frac{w}{r_2},$$

aus der letzteren

$$i_2 + J = i_1 = J\,\frac{w + r_2}{r_2};$$

*) Unter der Stromstärke im Anker verstehen wir die beiden Zweigströme der Ankerhälften zusammengenommen.

indem man diese Werthe in der Gleichung für γ substituirt und reducirt, findet man:

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{r_1}{w} + 2\frac{r_1}{r_2} + \frac{w\,(r_1 + r_2)}{r_2^2}},$$

welcher Ausdruck, wie die Differentialrechnung lehrt, am grössten wird, wenn

$$w = r_2 \sqrt{\frac{r_1}{r_1 + r_2}}.$$

Aehnliche Formeln lassen sich für die Compoundschaltungen ableiten *).

209 **Beziehung zwischen Stromstärke, elektromotorischer Kraft, Klemmspannung und Widerstand, dargestellt durch die charakteristische Curve.** Wir haben oben auseinandergesetzt, dass bei der dynamoelektrischen Maschine (worunter wir zunächst eine solche mit normaler Schaltung ins Auge fassen) die elektromotorische Kraft E auch bei constanter Tourenzahl v sich ändert, wenn durch Veränderung des Widerstandes die Stromstärke J geändert wird. Es ist deshalb nicht möglich, wie bei einer magnetelektrischen Maschine, aus dem Ohm'schen Gesetze allein die Klemmspannung und Stromstärke zu berechnen, welche die Maschine bei irgend einem äusseren Widerstande entwickeln wird. Es müsste hierzu erst das Gesetz bekannt sein, nach welchem die Intensität des Magnetfeldes, von welchem ja die elektromotorische Kraft abhängt, mit der Stärke des Stromes, der die Magnetschenkel umfliesst, sich ändert. Die in dem §. 177 angeführten Gesetze und Formeln von Lenz und Jacobi, J. Müller, v. Waltenhofen etc. sind hierzu theils wegen ihrer beschränkten Gültigkeit, theils wegen ihrer complicirten Form im Allgemeinen nicht geeignet **).

v. Hagenbach ***) hat 1876 zuerst die Beziehungen zwischen Widerstand, Tourenzahl, Stromstärke und elektromotorischer Kraft einer Dynamomaschine in der Hauptsache experimentell ermittelt; eine genauere Feststellung der diesbezüglichen empirischen Gesetze erfolgte durch die Arbeiten von J. Hopkinson und insbesondere von M. Deprez und O. Frölich †). Von R. Clausius wurde die eingehendste Theorie der Maschine veröffentlicht. In derselben Richtung waren noch

*) Siehe hierüber Näheres in Kittler, Handb. der Elektrotechnik I, S. 322.

**) Dem von S. P. Thompson (Exner's Repert. XXII, S. 200) geäusserten Wunsche, dass deshalb diese Formeln aus den Lehrbüchern verschwinden möchten, glaubten wir aus dem Grunde nicht entsprechen zu sollen, weil diese Formeln ein allgemein physikalisches, jedenfalls aber ein historisches Interesse gewähren.

***) Pogg. Ann. 158, S. 599.

†) „Die dynamoelektr. Maschine". Berlin 1886.

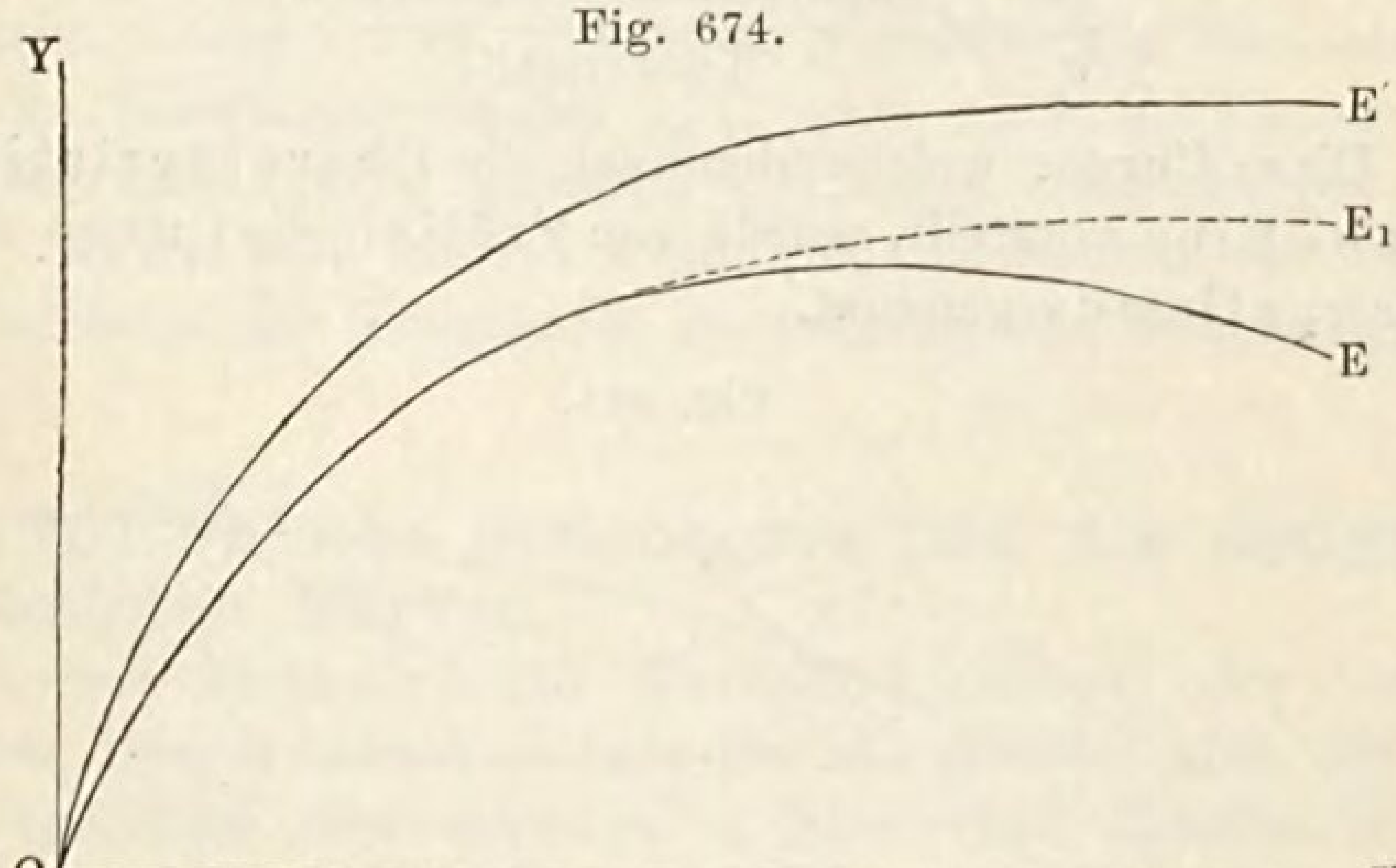
W. Thomson, Joubert, Mascart, v. Waltenhofen u. A. thätig. Silv. Thompson verdanken wir die Anwendungen auf die übrigen Schaltungsweisen der Dynamomaschine.

Um zunächst die Abhängigkeit der elektromotorischen Kraft E der Maschine von der Stromstärke J bei constanter Tourenzahl darzustellen, haben Hopkinson und dann Deprez je eine Curve benutzt, welche von Letzterem als „charakteristische Curve" oder „Charakteristik" bezeichnet wurde. Man erhält die Hopkinson'sche Curve, indem man unter Beibehaltung irgend einer Rotationsgeschwindigkeit des Ankers durch Einschaltung verschiedener äusserer Widerstände die Stromstärke auf verschiedene Werthe, J_1, J_2, J_3 . . ., bringt, die zugehörigen Werthe der elektromotorischen Kraft, E_1, E_2, E_3 . . ., ermittelt und dann erstere als Abscissen, letztere als Ordinaten eines rechtwinkeligen Coordinatensystems aufträgt. Die Ermittelung der Werthe E geschieht am einfachsten durch Messung der Klemmspannung e, der Stromstärke J und des Gesammtwiderstandes der Maschine r innerhalb der Klemmen, wobei darauf Rücksicht zu nehmen ist, dass dieser Widerstand durch die Stromwärme selbst beeinflusst wird. Man hat dann:

$$E = e + JR.$$

Die so erhaltene Curve hat je nach dem Baue der Maschine eine der in Fig. 674 dargestellten Formen OE oder OE_1. Je grösser die Eisen-

Fig. 674.



massen der Feldmagnete, je geringer demnach die Rückwirkung des Ankerstromes bei stärkeren Stromstärken auf das Magnetfeld sich zu äussern vermag, desto mehr nähert sich die Charakteristik zuletzt asymptotisch einer zur Abscissenaxe parallelen Geraden.

Die Deprez'sche charakteristische Curve erhält man, indem man nach Unterbrechung der Verbindung zwischen Schenkelwindungen und Anker durch erstere einen fremden Strom wechselnder Stärke strömen lässt und die gleichzeitige Klemmspannung des rotirenden Ankers misst. Letzteres geschieht entweder bei offenen Bürsten mit-

telst des Elektrometers oder bequemer nach Einschaltung eines so grossen Widerstandes, dass der im Anker zu Stande kommende Strom keine merkliche Rückwirkung auf das Magnetfeld auszuüben vermag, mittelst des Torsionsgalvanometers. Die Deprez'sche Charakteristik hat etwa die Form wie OE' (Fig. 674). Die Hopkinson'sche Curve entspricht mehr den thatsächlichen Verhältnissen beim Betriebe, die Deprez'sche ist mehr geeignet, das theoretische Gesetz über die Abhängigkeit des Magnetismus von der Stromstärke zu ermitteln. Je stärker die Feldmagnete, desto mehr nähern sich beide Curven einander.

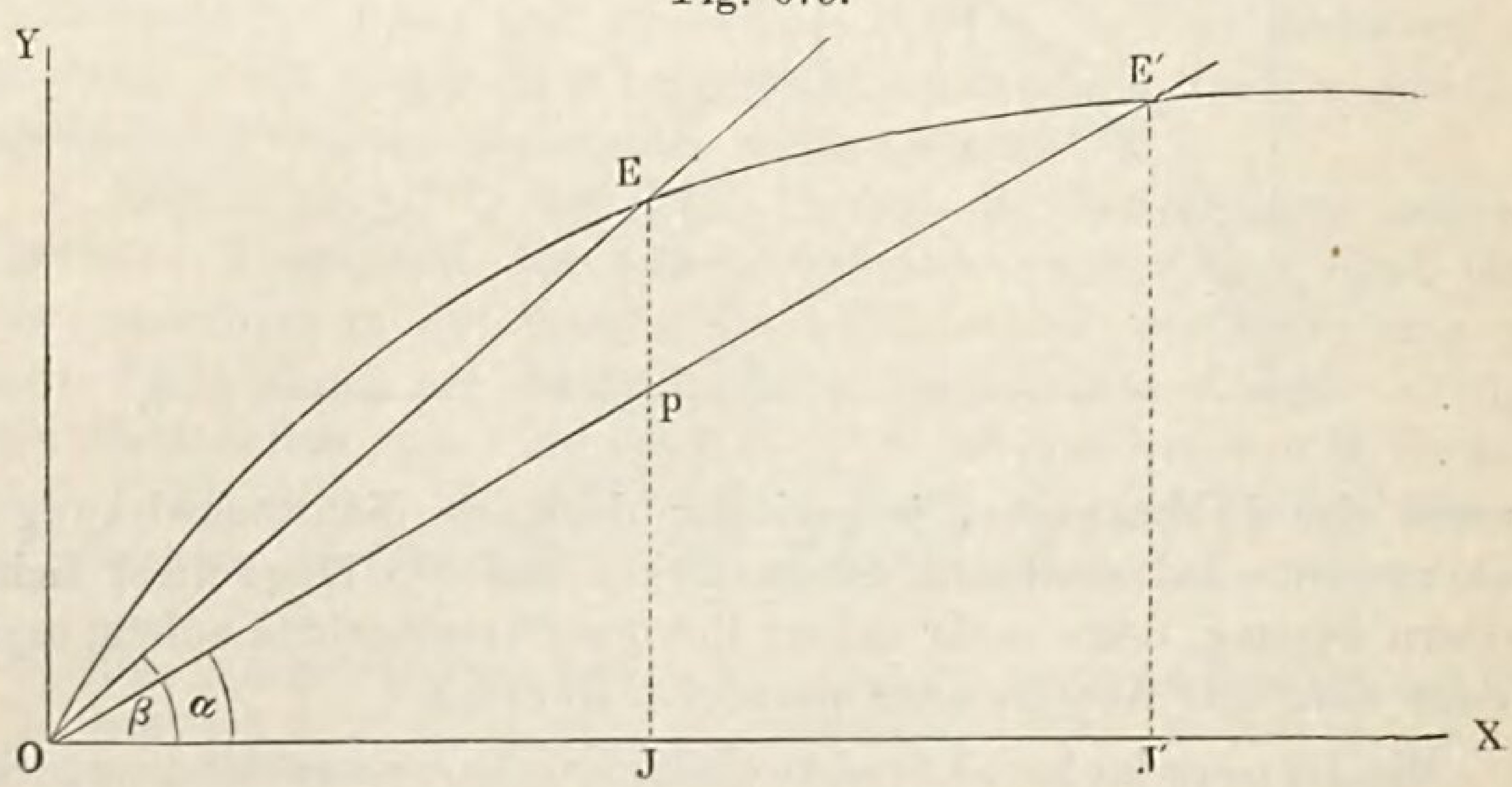
Ist der remanente Magnetismus der Feldmagnete verschwindend klein, so beginnt die Charakteristik im Anfangspunkt O, anderenfalls beginnt sie mit einem positiven Werthe. Ihr erster Anstieg ist angenähert geradlinig, dann wendet sie sich mehr oder weniger rasch nach rechts.

Bestimmt man die Charakteristik für verschiedene Tourenzahlen, so erhält man für die elektromotorischen Kräfte Werthe, welche angenähert der Tourenzahl proportional sind. Man kann daher zur Vereinfachung an Stelle sämmtlicher charakteristischen Curven einer Maschine eine einzige Curve benutzen, welche man erhält, indem man als Abscissen wiederum die Stromstärken J, als Ordinaten die Werthe

$$\frac{E}{v} = \frac{\text{Elektromotorische Kraft}}{\text{Tourenzahl}}$$

aufträgt. Diese Curve, welche demnach die Charakteristik für die Tourenzahl Eins vorstellt, wurde von Frölich die Curve des wirksamen Magnetismus genannt.

Fig. 675.



Von den zahlreichen sinnreichen Anwendungen, welche Deprez von der Charakteristik gemacht hat, wollen wir nur nachfolgende hervorheben. Es sei OEE' (Fig. 675) die Charakteristik einer Maschine für

eine bestimmte Tourenzahl. Für irgend eine Stromstärke J, entsprechend der Abscisse $\overline{OJ}$, ist demnach $E = \overline{EJ}$ die zugehörige elektromotorische Kraft. Ziehen wir OE, so ist $tang\,\beta = \frac{\overline{EJ}}{\overline{OJ}} = \frac{E}{J} = W$ der Gesammtwiderstand des ganzen Stromkreises. Kennt man nun den Widerstand r der Maschine zwischen den Polklemmen und trägt man die Gerade OE' so auf, dass sie einen Winkel α mit OX einschliesst, dessen trigonometrische Tangente $tang\,\alpha = r$ ist, so stellt die Ordinate $\overline{E'J'}$ die elektromotorische Kraft der Maschine für Kurzschluss, $\overline{OJ'}$ die zugehörige Stromstärke vor; diese beiden Werthe sind Maximalwerthe.

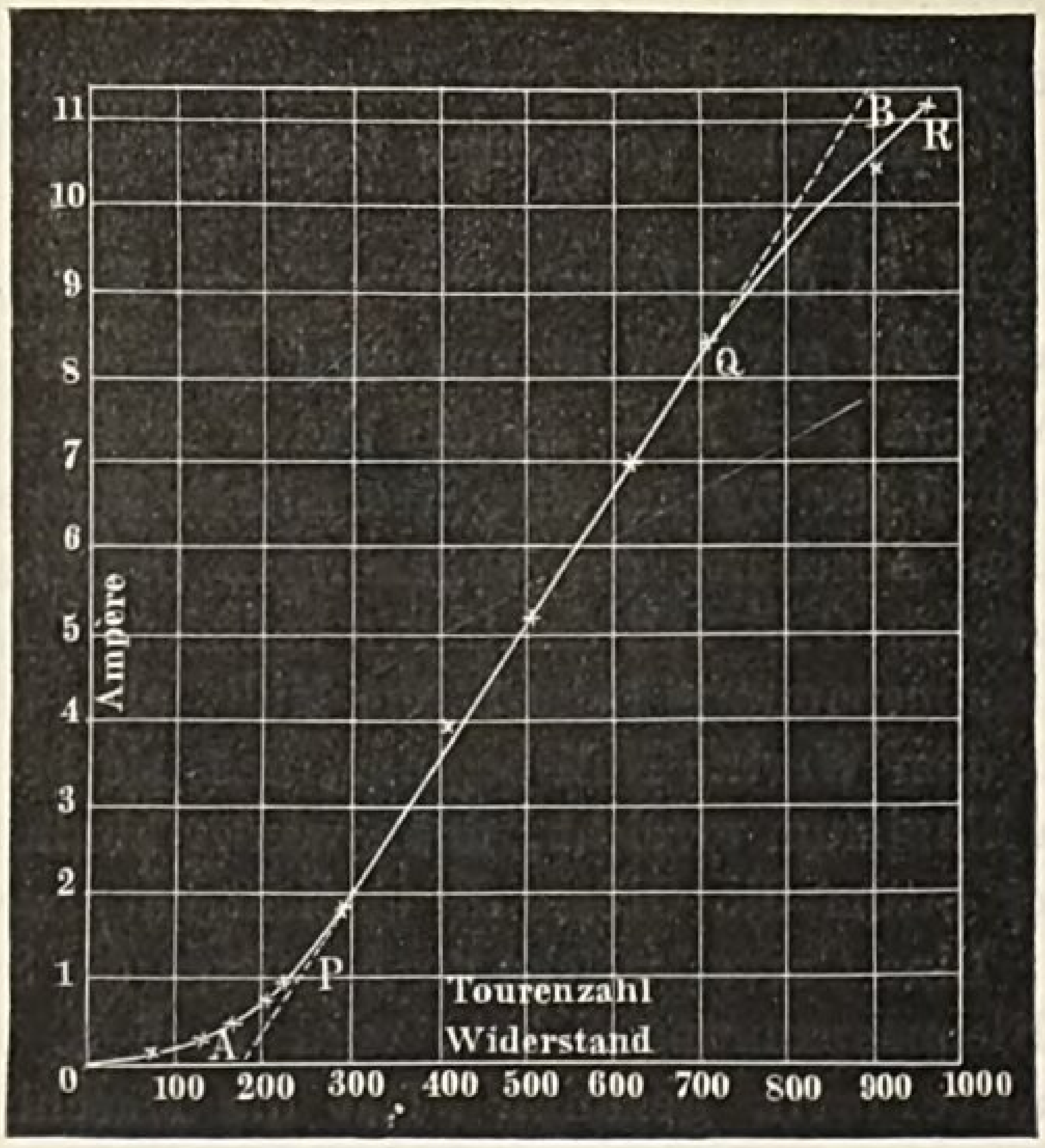
Nach §. 208 II. ist die Klemmspannung $e = E - Jr$. Da aber E durch die Ordinate EJ gegeben ist und da $\overline{PJ} = \overline{OJ}.\ tang\ \beta = Jr$ ist, so entspricht dem $e = E - Jr$ das Stück $\overline{EP} = \overline{EJ} - \overline{PJ}$. Die Klemmspannung für irgend eine Stromstärke J ist demnach dargestellt durch jenen Abschnitt der zugehörigen Ordinate, welcher sich zwischen der Geraden OE' und der Curve befindet. Man übersieht sofort, dass die Klemmspannung beim Strom Null, also bei sehr grossem Widerstande mit dem Werthe Null beginnt, dass sie bei einer gewissen Stromstärke ein Maximum erreicht, dann wieder abnimmt und = Null wird, sobald der Strom die Grösse J' erreicht hat, welche bei Kurzschluss eintritt. Eine Curve, welche zu Abscissen die Stromstärken, zu Ordinaten die Klemmspannungen hat, wird nach S. Thompson die äussere Charakteristik genannt. Hat die Maschine eine andere Tourenzahl, so hat man einfach sämmtliche Ordinaten der Charakteristik im Verhältniss der Tourenzahl zu vergrössern, beziehungsweise zu verkleinern.

Die Frölich'sche Stromcurve und die übrigen daraus abgeleiteten Curven. 210

Eine andere Methode, die Wechselbeziehungen der elektrischen Grössen einer Dynamomaschine darzustellen, gründet sich auf die von Frölich eingeführte „Stromcurve". Man erhält dieselbe, indem man als Abscissen die Werthe des Verhältnisses $\frac{v}{W} = \frac{\text{Tourenzahl}}{\text{Gesammtwiderstand}}$, als Ordinaten die Stromstärken J aufträgt. Da nämlich die Stromstärke unter sonst gleichen Umständen der elektromotorischen Kraft und diese (wenigstens nahe) der Tourenzahl direct proportional ist, dagegen die erstere verkehrt proportional dem Gesammtwiderstande, so muss es möglich sein, J als (nahe) dieselbe Function des Verhältnisses $\frac{v}{W}$ zu erhalten, welche Werthe auch v und W (innerhalb gewisser Grenzen) annehmen. Die Fig. 676 (a. f. S.) zeigt eine solche Stromcurve $OPQR$, welche an einer im physikalischen Institut in Innsbruck befind-

lichen Handmaschine von Fein beobachtet wurde*). Die Erfahrung hat ergeben, dass diese Curve bei den meisten Maschinen einen ähnlichen Verlauf nimmt. Innerhalb jener Werthe von $\frac{v}{W}$, welche in der Praxis vorkommen (in der Figur innerhalb der Punkte P und Q), schliesst sie sich sehr nahe einer geraden Linie AB an, deren Verlängerung die

Fig. 676.



Abscissenaxe in einem Abstande OA schneidet. Die Gleichung dieser Geraden hat also die Form:

$$J = B\,\frac{v}{W} - A \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

wo A und B zwei Constanten sind, deren Zahlenwerth vom Bau der Maschine und von den Einheiten abhängt, nach welchen die Tourenzahl, der Widerstand und die Stromstärken gemessen werden. So z. B. ergab die erwähnte Handmaschine von Fein die Gleichung:

$$J = 0{,}01582\,\frac{v}{W} - 2{,}621\,^{**}),$$

*) Diese mit zwei Kurbeln montirte Maschine hat sich gut bewährt; nur war, um bei stärkeren Strömen das Gleiten des Riemens zu verhindern, nöthig, ein Vorgelege zwischen Schwungrad und Riemenscheibe des Ankers einzuschalten.

**) Aus den zwischen P und Q gelegenen Messungen nach der Methode der kleinsten Quadrate berechnet. Da die bei verschiedener Tourenzahl erhaltenen Werthe nicht unerheblich differirten, wurden der Rechnung ausschliesslich die bei der Tourenzahl 1320 erhaltenen Zahlen zu Grunde gelegt.

wobei die Stromstärke nach Ampère, der Widerstand nach Ohm, die Tourenzahl nach Umdrehungen pro Minute gemessen wurden.

Die Thatsache, dass die Stromcurve (innerhalb gewisser Grenzen) durch eine Gleichung einer geraden Linie dargestellt werden kann, lässt aber auch eine einfache Beziehung zwischen der Intensität des magnetischen Feldes M und der Stromstärke J der Maschine ableiten. Offenbar ist die elektromotorische Kraft E der Maschine proportional dieser Magnetintensität M und der Tourenzahl v. Wir können daher setzen:

$$E = Mv,$$

wobei wir als Einheit der Magnetintensität jene annehmen, welche bei der Tourenzahl 1 die elektromotorische Kraft 1 entwickelt*). Aus dieser Gleichung, sowie aus der Beziehung

$$E = JW$$

und der oben gegebenen Stromgleichung 1) folgt aber durch Elimination von E und $\frac{v}{W}$ die Gleichung:

$$M = \frac{BJ}{A+J} = \frac{J}{\frac{A}{B} + \frac{1}{B} J},$$

welche wir mit Einführung neuer Constanten $a = \frac{A}{B}$ und $b = \frac{1}{B}$ folgendermaassen schreiben können:

$$M = \frac{J}{a + bJ} \text{ oder } = \frac{1}{\frac{a}{J} + b} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

Die physikalische Bedeutung der Constanten $b = \frac{1}{B}$ geht hervor, indem man $J = \infty$ werden lässt, wodurch $\frac{a}{J} = o$ und $M = \frac{1}{b} = B$ wird. Offenbar ist letzteres der Maximalwerth, den der Magnetismus annehmen könnte, wenn er ganz gesättigt würde. Die Bedeutung von a erhellt, indem man J klein werden lässt; es nähert sich dann M der Grösse $\frac{1}{a} J$. Es ist also $\frac{1}{a}$ der Factor der anfänglichen Proportionalität zwischen M und J.

Die Gleichung 2) hat zunächst nur einen empirischen Charakter; doch hat S. Thompson**) darauf aufmerksam gemacht, dass sich die-

*) Frölich hat später den Maximalwerth des Magnetismus = Eins gesetzt. Man vergleiche die berichtigenden Bemerkungen von A. v. Waltenhofen, Wiener Zeitschr. f. Elektrot. 1886, S. 450; 1888, S. 103.

**) Exner's Repertor. XXII, S. 197.

selbe aus einer physikalischen Theorie von Lamont*), welche auch von Bosanquet**) neuerdings ausgebildet wurde, ableiten lasse. Schon früher ist J. Stefan bei seinen Untersuchungen über die Tragkraft der Ringmagnete zu einer solchen Formel gelangt***). Wir können hier auf diesen Gegenstand nicht weiter eingehen.

Endlich wollen wir noch zeigen, wie die Stromcurve dazu benutzt werden kann, um bei constanter Tourenzahl v die Abhängigkeit der übrigen elektrischen Grössen von dem Gesammtwiderstande (also auch vom äusseren Widerstande) darzustellen.

Setzt man nämlich in der Gleichung 1) v constant, und schreibt für Bv eine neue Constante B', so erhält man

$$J = \frac{B'}{W} - A \quad \ldots \ldots \ldots \quad 3)$$

Dies ist die Gleichung einer gleichseitigen Hyperbel, welche die Abscissenaxe im Abstande $\frac{B'}{A}$ schneidet, und welche die Stromstärke in ihrer Abhängigkeit vom Gesammtwiderstande W der Stromleitung darstellt.

Aus 3) ergiebt sich dann für die elektromotorische Kraft:

$$E = JW = B' - AW \quad \ldots \ldots \quad 4)$$

das ist die Gleichung einer geraden Linie, welche die Abscissenaxe im nämlichen Abstande $\frac{B'}{A}$ schneidet. Endlich erhält man die Klemmspannung:

$$e = J(W - r) = \frac{B'(W - r)}{W} - A. \quad \ldots \quad 5)$$

das ist eine Curve, welche für $W = r$ und für $W = \frac{B'}{A}$ die Ordinatenwerthe Null und dazwischen ein Maximum giebt.

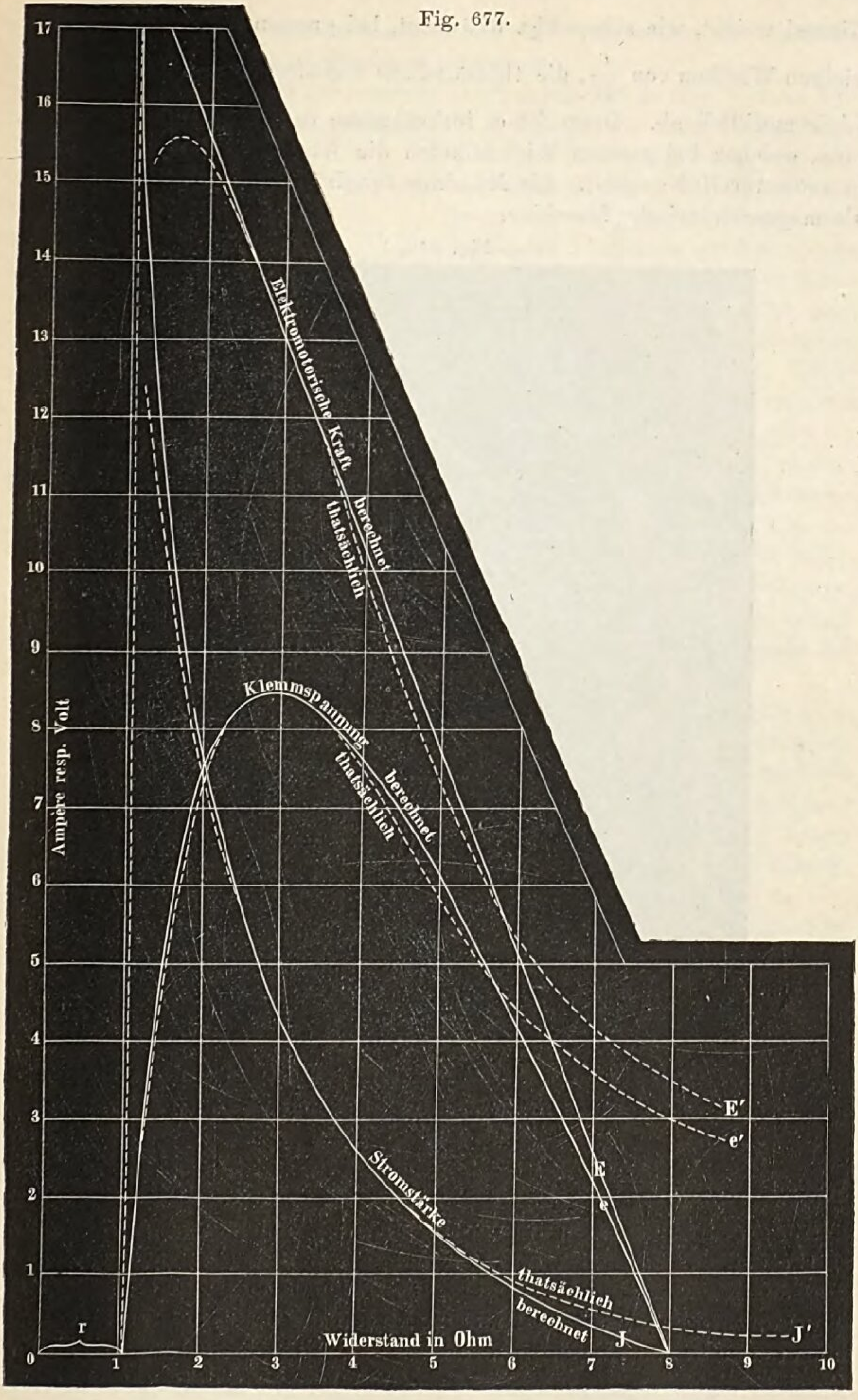
Die Fig 677 zeigt diese drei Curven, wie sie sich für die oben erwähnte Handmaschine von Fein aus der Stromcurve

$$J = 0{,}01582 \frac{v}{W} - 2{,}621$$

für die Tourenzahl $v = 1320$ berechnen lassen. Der Widerstand der Maschine war hierbei $r = 1{,}06$ Ohm. Neben den ganz ausgezogenen berechneten Curven sind punktirt die thatsächlichen Curven hinzugezeichnet, um zu zeigen, wie weit sich die Theorie den thatsächlichen Verhältnissen anschliesst. Man sieht, dass grössere Abweichungen erst bei grösseren Widerständen vorkommen. Es hat dies zwei Ursachen.

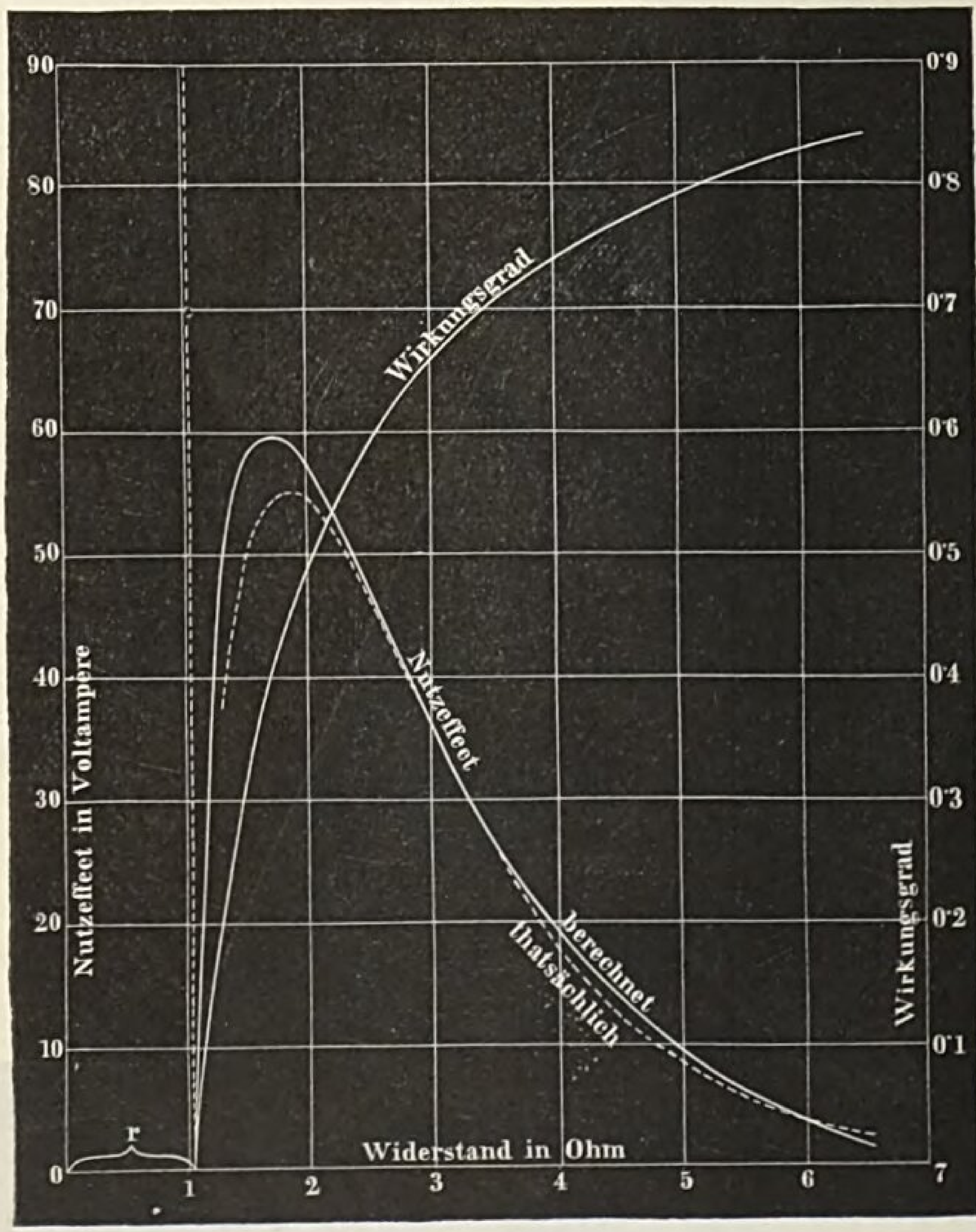
*) Handb. v. d. Magnetismus 1867, S. 41.
**) Phil. Mag. 5, Vol. XIX, p. 85 (1885).
***) Wiener Akad. Ber. LXXXI, 2, S. 100 (1880)

Fig. 677.


Ampère resp. Volt
Widerstand in Ohm
Elektromotorische Kraft
berechnet
thatsächlich
Klemmspannung
berechnet
thatsächlich
Stromstärke
thatsächlich
berechnet
E'
e'
E
e
J
J'
r
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17

Einmal weicht, wie schon Fig. 676 zeigt, bei grossen Widerständen, also kleinen Werthen von $\frac{v}{W}$, die thatsächliche Stromcurve von der geraden Linie merklich ab. Dann ist es insbesondere der remanente Magnetismus, welcher bei grossen Widerständen die Wirksamkeit der Maschine in grösserer Höhe erhält. Die Maschine fungirt hierbei gewissermaassen als magnetelektrische Maschine.

Fig. 678.



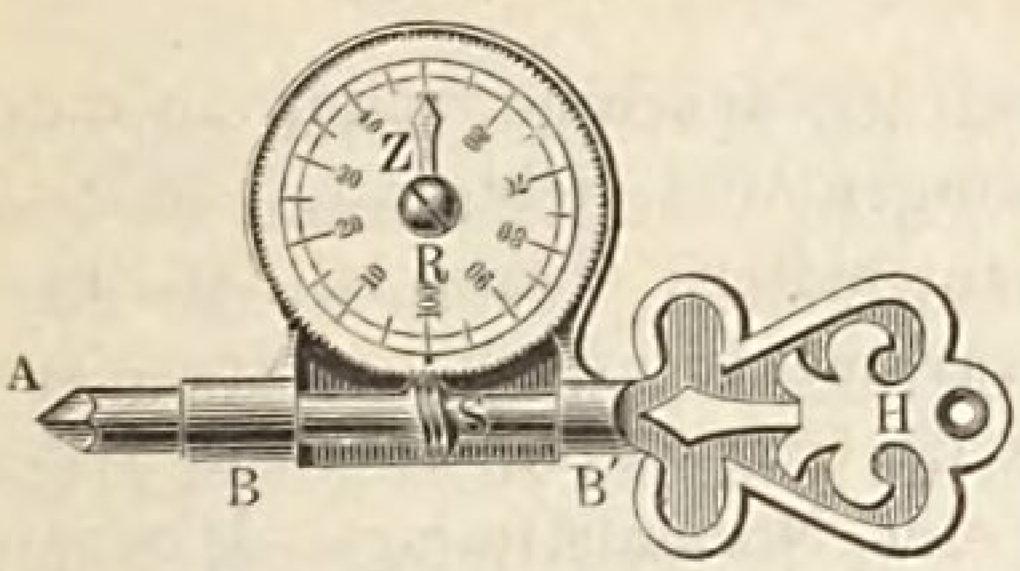
In Fig. 678 sind für dieselbe Maschine die Curven des Nutzeffects und des Wirkungsgrades in anderen Ordinatenmaassstäben dargestellt.

211 **Hülfsapparate zur Dynamomaschine, Tourenzähler, Tachometer, Dynamometer, Rheostate; absoluter Wirkungsgrad.** Die Apparate zur Messung des Widerstandes, der Stromstärke und der Klemmspannung wurden bereits früher beschrieben. Zur Messung der Rotationsgeschwindigkeit der Dynamomaschine benutzt man Tourenzähler, welche aber nur die Anzahl der Umdrehungen in einem längeren Zeitraum von einer oder mehreren Minuten, also die mittlere Geschwindigkeit während dieses Zeitraums zu ermitteln gestatten, oder

eigentliche Geschwindigkeitsmesser (Tachometer), welche die momentane Geschwindigkeit abzulesen ermöglichen.

Ein einfacher, viel gebrauchter Tourenzähler ist in Fig. 679 in halber natürlicher Grösse abgebildet. In den Lagern B und B' läuft eine stählerne Achse AS, welche bei A mit einer kantigen Spitze, bei S mit mehreren Schraubengängen versehen ist. Letztere greifen in die Zähne des Rades R, welches jedesmal um einen Zahn gedreht wird, so oft die Stahlaxe eine Umdrehung macht. Da das Rad 100 Zähne hat, so entsprechen einem Umlauf desselben 100 Touren der Stahlaxe. Die Stellung des Rades wird an einem feststehenden Zeiger Z abgelesen. Um eine Messung zu machen fasst man das Instrument bei H, stellt das Rad auf Null und drückt zu Beginn einer Minute die Spitze A gegen eine Vertiefung in der Axe des rotirenden Ankers. Hierauf zählt man die ganzen Umgänge des Rades und entfernt das Instrument genau mit Schluss einer (oder mehrerer) Minuten von der Maschine. Die Anzahl der vorübergegangenen Zähne, dividirt durch die Anzahl der verflossenen Minuten (Secunden), giebt die Tourenzahl per Minute (Secunde).

Fig. 679.



Unter den Tachometern ist das von Buss, Sombart u. Comp. in Magdeburg sehr verbreitet, es beruht auf einem federnden Centrifugalpendel, welches in einer cylindrischen Büchse eingeschlossen ist und zugleich mit dem Anker in Rotation versetzt wird. Jeder Geschwindigkeit entspricht eine bestimmte Stellung des Pendels, welches auf einen Zeiger wirkt, der dann auf einem Zifferblatte direct die Geschwindigkeit ablesen lässt.

Der Verfasser hat sich bei seinen Messungen an einer Handmaschine mit recht gutem Erfolge einer acustischen Methode bedient, welche zwar nicht jede beliebige Geschwindigkeit zu messen gestattet, wohl aber ermöglicht, eine Reihe von vorausbekannten Geschwindigkeiten mit grosser Genauigkeit einzuhalten. Auf der Axe des Ankers war eine Seebeck'sche Sirenenscheibe aus Zinkblech befestigt, welche mit concentrischen Löcherreihen und mit einer verstellbaren Blaseöffnung (Bd. I, S. 726, Fig. 703 BCD) versehen war. Durch einen Schlauch wurde gleichzeitig oder alternirend ein Stimmpfeifchen von 440 Schwingungen per Secunde und die erwähnte Blaseöffnung angeblasen. Wurde nun die letztere auf eine Löcherreihe mit n Löchern gestellt und die Maschine so schnell gedreht, dass die Sirene dieselbe Tonhöhe gab, wie das Pfeifchen, so war die Tourenzahl $= \frac{440}{n}$ per Secunde oder $\frac{26400}{n}$ per Minute. Das folgende Täfelchen giebt die letztere Tourenzahl sofort ohne Rechnung:

Löcherzahl	Tourenzahl	Löcherzahl	Tourenzahl
11	2400	16	1650
12	2200	17	1553
13	2031	18	1467
14	1886	19	1381
15	1760	20	1320

Wenn die Person, welche die Kurbel der Maschine treibt, ein musikalisches Gehör hat oder auf die Schwebungen Acht giebt, kann sie leicht die Tourenzahl auf $^1/_2$ Proc. genau constant halten; ebenso ist der Physiker in der Lage, die Ablesungen am Instrumente auf einen Moment zu verlegen, wo die Töne möglichst genau im Unisono zu einander stehen. Statt des Stimmpfeifchens kann auch eine Normalstimmgabel benutzt werden, welche man von einem Gehülfen in Zwischenpausen streichen lässt. Wir halten diese Methode für genauer und sicherer als die mittelst des Tourenzählers.

Die von aussen auf die Dynamomaschine übertragene Arbeit kommt zum Theil innerhalb derselben als Product $J^2 r$, zum Theil ausserhalb derselben als Nutzeffect $J^2 w$ zum Vorscheine, wobei r den Widerstand der Maschine, w jenen der Nutzleitung bedeuten. Ausserdem wird aber noch ein Theil der Arbeit zur Ueberwindung der Reibung an Axenlagern und Bürsten etc., sowie des Luftwiderstandes, und zur Erzeugung von nicht beabsichtigten Inductionsströmen im Eisen des Ankers verwendet, welcher Antheil zuletzt ebenfalls in Wärme verwandelt wird. Eine Maschine functionirt desto besser, je kleiner dieser letztere Antheil ist.

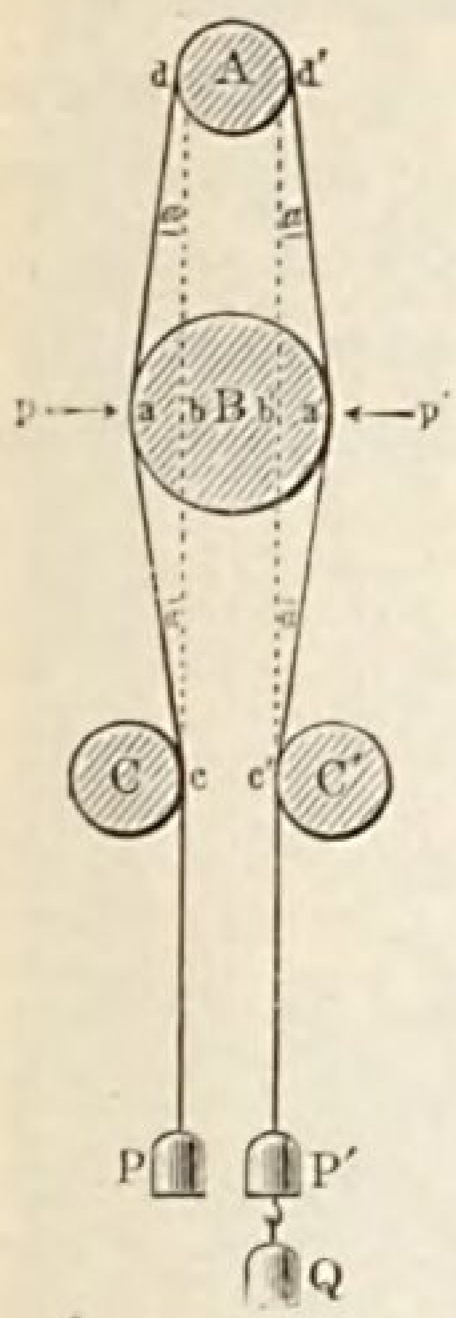
Während man das Verhältniss $\frac{J^2 w}{J^2(r+w)} = \frac{w}{r+w}$ den elektrischen Wirkungsgrad nennt (§. 208), bezeichnet man das Verhältniss $\frac{J^2 w}{A}$, worin A die ganze auf die Maschine übertragene Energie bedeutet, als absoluten oder mechanischen (auch als commerciellen) Wirkungsgrad. Um diesen zu messen, braucht man einen Arbeitsmesser [Dynamometer*)]. Es giebt zweierlei Arten solcher Instrumente. Das gewöhnliche Bremsdynamometer (Bd. I, S. 361, Fig. 337) gehört zu der ersteren Art; es gestattet die Arbeit eines Motors nur in der Weise zu messen, dass man auf die gleichzeitige Ausnutzung derselben verzichtet, da sie im Messinstrumente selber in Wärme verwandelt wird. Man könnte also nur in der Weise verfahren, dass man einen Motor (Dampfmaschine) zweimal nach einander ganz gleich wirken lässt, das eine Mal seine Arbeit am Dynamometer misst, das andere Mal ihn auf die Dynamomaschine wirken lässt. Viel zweckmässiger ist die zweite Art von Dynamometern, welche die Arbeit messen, während sie zu nützlicher Wirkung übertragen wird (Transmissionsdynamometer).

*) Nicht zu verwechseln mit dem zur Strommessung dienenden, weiter unten zu beschreibenden Elektrodynamometer.

Unter den vielen sinnreichen Apparaten dieser Art*) wollen wir das v. Hefner-Alteneck'sche Dynamometer beschreiben und sein Princip zuvor an der Fig. 680 auseinandersetzen.

Um die fixe Rolle A sei eine Schnur gelegt, welche unten zunächst mit gleichen Gewichten P und P' gespannt wird. B sei eine grössere Rolle, deren Axe parallel zu sich selbst in horizontaler Richtung verschiebbar ist. C und C' seien zwei fixe Rollen, welche den Schnurenden eine bestimmte Lage geben, so dass die Schnurtheile ac, ac' ebenso wie ad und $a'd'$ gleich grosse Winkel α mit der Verticalrichtung einschliessen. Von dem nach abwärts ausgeübten Zuge P wird dann auf beiden Seiten der Rolle B eine horizontale Componente $p = 2P \sin\alpha$ zur Wirkung gelangen. Bei gleicher Belastung bleibt daher die Axe der Rolle B im Gleichgewichte. Belastet man aber, während A mitsammt der anliegenden Schnur festgehalten wird, auf der rechten Seite noch mit einem weiteren Gewichte Q, so wird auf die Rolle B von rechts nach links ein Ueberdruck $p' - p = 2\,Q \sin\alpha$ ausgeübt, wodurch dieselbe verschoben werden muss. Denken wir uns diesen Ueberdruck durch einen ebenso grossen Federdruck auf der Gegenseite aufgehoben und nun die Rolle A frei gegeben. Sinkt nun $P + Q$ um h Meter, so wird auf die Rolle A eine Arbeit $= Qh$ übertragen.

Fig. 680.



Wäre Q nicht bekannt, wohl aber der erwähnte Federdruck $p' - p$, so könnte man ersteres aus der Gleichung:

$$Q = \frac{p' - p}{2 \sin\alpha}$$

berechnen und die Arbeit wäre

$$A = \frac{h(p' - p)}{2 \sin\alpha}$$

oder, wenn man zur Bequemlichkeit der Rechnung $\alpha = 30^0$ macht:

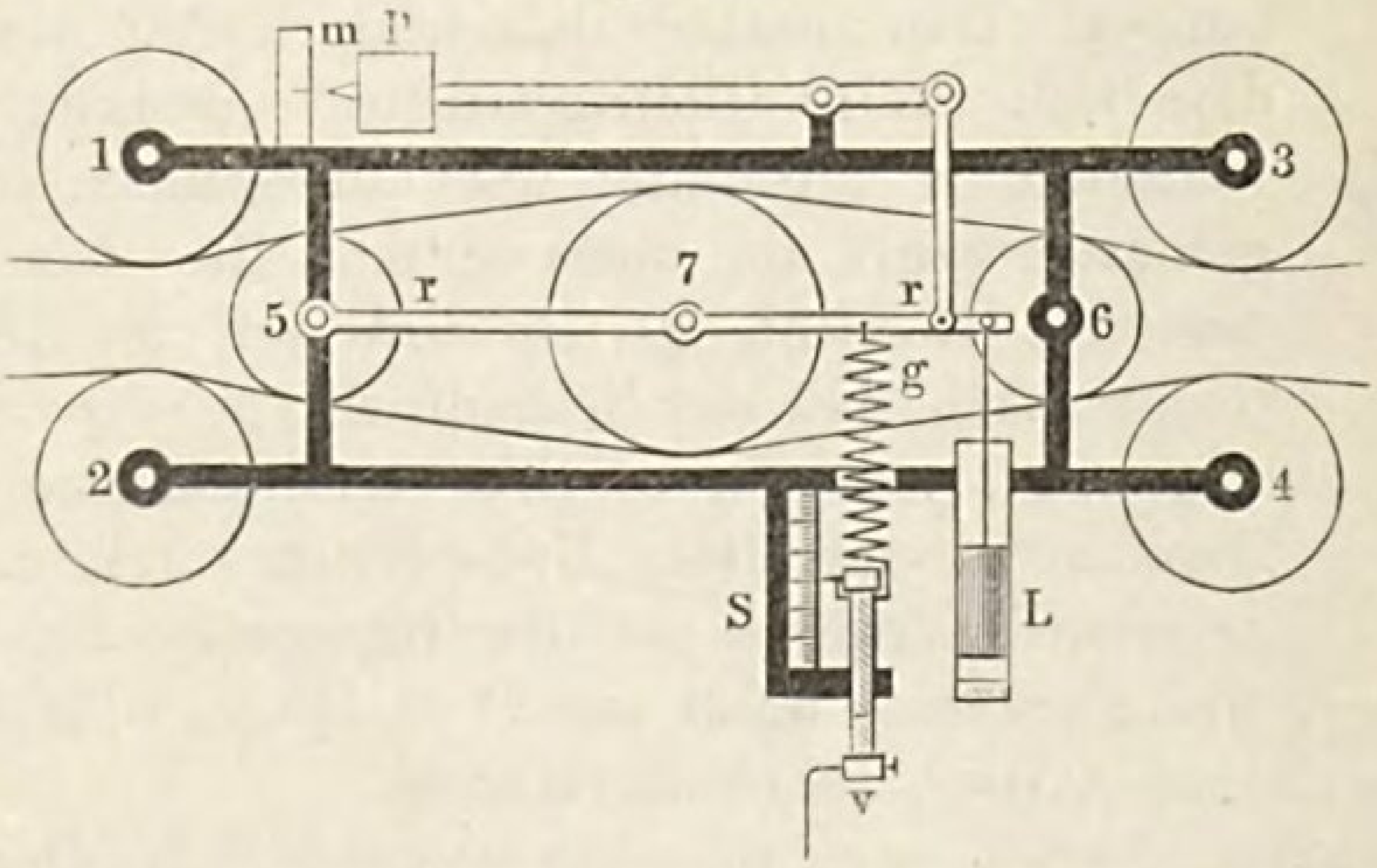
$$A = h\,(p' - p).$$

Bei dem zu beschreibenden Dynamometer treten nun an Stelle der Kräfte P und $P + Q$ die Spannungen des Riemens, der die Arbeit von der Motorwelle auf die Riemenscheibe der Dynamomaschine überträgt; an die Stelle von h tritt die Umfangsgeschwindigkeit der Riemenscheibe, wenn man die Arbeit per Secunde (den Effect) bestimmen will. Fig. 681 (a. f. S.) giebt eine schematische Zeichnung des Apparates. Die Rollen 1 bis 6 sind in einem eisernen Gestell fest mit einander verbunden, die siebente ist in einem um die Axe der Rolle 5 beweglichen Rahmen r gelagert,

*) Siehe Kittler, Handb. d. Elektrotechnik I, S. 326 bis 354.

so dass sie ein wenig nach oben und unten ausweichen kann. Diese Bewegung überträgt sich durch ein Hebelwerk auf die Spitze m, welche einer festen Marke gegenüber steht. Der Apparat wird zwischen dem Motor und der Dynamomaschine so aufgestellt, dass der Riemen oberhalb der drei Mittelrollen hin- und unterhalb derselben zurückgeführt ist. Bei vollständig symmetrischer Lage der Rolle 7 zeigt der Zeiger m auf die Marke. Um dies bei ruhendem Riemen genau zu erreichen, wird das Laufgewicht p passend verschoben. Während der Bewegung, welche so erfolgen muss, dass der untere Riemen der vom Motor angezogene, also stärker gespannte ist, wird dann die Feder g so stark angezogen, dass der Zeiger m wieder auf die Marke zeigt. Die zugehörige Federspannung wird dann abgelesen. Um kleinere rasche Schwankungen zu

Fig. 681.

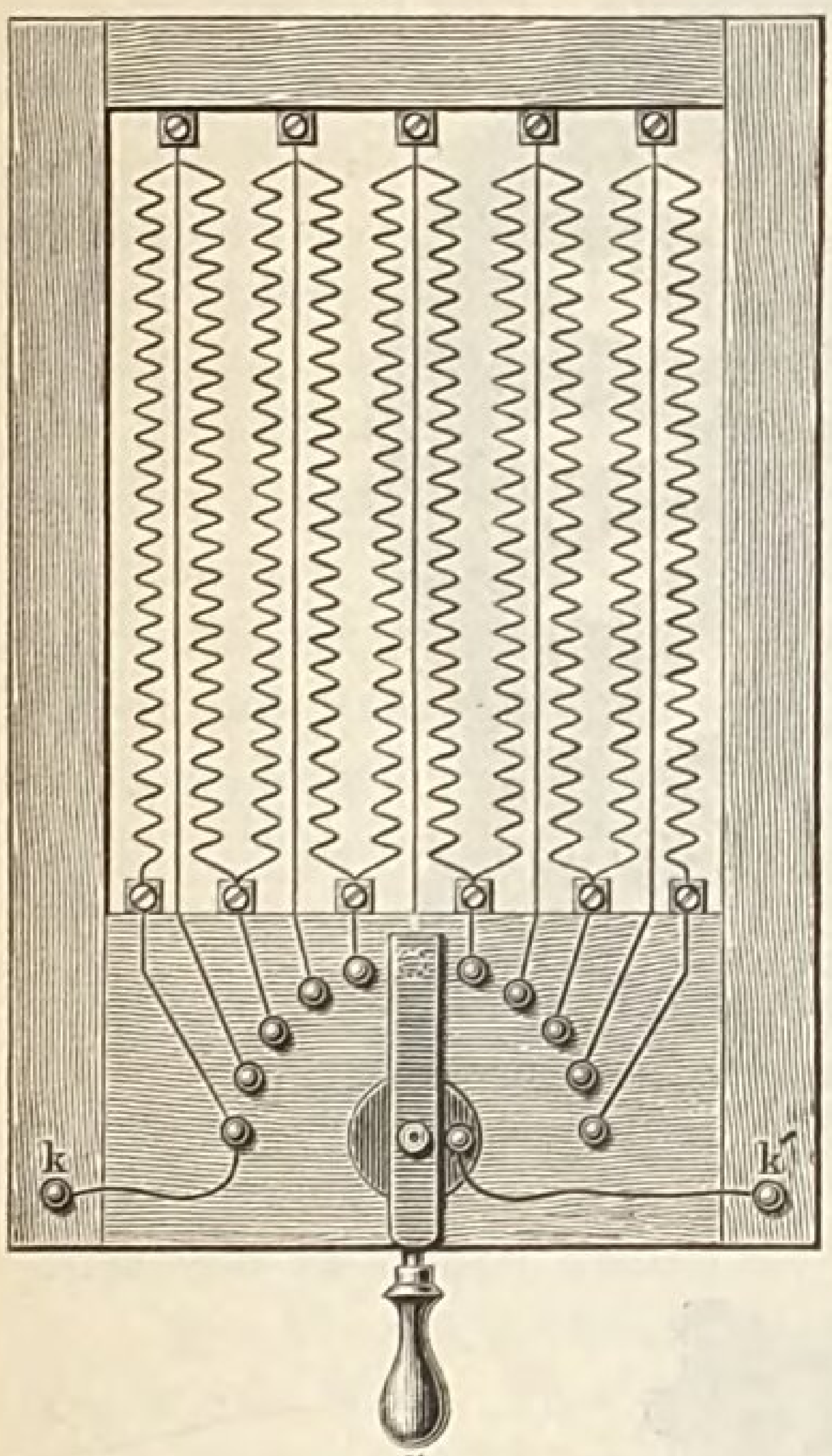


dämpfen, ist noch eine Frictionspumpe L angefügt. Die Scala S der Feder wird empirisch geprüft, indem man den Apparat ähnlich wie in Fig. 680 mit ungleichen Belastungen versieht*). Aus der so erhaltenen Riemenspannungsdifferenz in Kilogrammen erhält man durch Multiplication mit der Riemengeschwindigkeit (in Metern) den Effect in Kilogrammmetern per Secunde; dividirt man diesen durch die Acceleration 9,81, so erhält man den auf die Dynamomaschine übertragenen mechanischen Effect A in Watt. Das Verhältniss zwischen dem elektrischen Nutzeffect zu diesem mechanischen Effect, also $\frac{J w}{A}$, giebt dann den absoluten oder mechanischen Wirkungsgrad. Derselbe sagt uns, der wie vielte Theil der vom Motor auf die Dynamomaschine übertragenen Arbeit in Form von Strom aus der Maschine heraustritt. Gute Dynamomaschinen geben einen elektrischen Wirkungsgrad von 90 bis 95 und einen absoluten Wirkungsgrad von 80 bis 85 Proc.

*) Besser als diese „statische“ Prüfungsmethode ist die „dynamische“. Um sie auszuführen, überträgt man vom Motor mittelst des zu prüfenden Transmissionsdynamometers die Arbeit auf ein Bremsdynamometer, welche man in bekannter Weise misst und mit den Angaben des ersteren Instrumentes vergleicht.

Ausser den beschriebenen Messapparaten benöthigt man einen in den Stromkreis der Dynamomaschine bequem einzuschaltenden Widerstandsballast, welcher zur Abschwächung des Stroms bis zur verlangten Stärke dient. Die feineren Widerstandsapparate sind dazu nicht zu gebrauchen, da sie zu sehr erwärmt würden. Fig. 682 zeigt den sehr gebräuchlichen Kurbelrheostaten. Die meist aus Neusilber hergestellten Drahtspiralen sind innerhalb eines Holzrahmens in der ersichtlichen Weise neben einander ausgespannt und mit den Contactknöpfen 0 bis 10 leitend verbunden. Auf letzteren schleift, durch eine Feder niedergedrückt, die mit dem Griffe *G* verstellbare Messingschiene, wodurch zwischen den Klemmen *k* und *k'* mehr oder weniger Widerstand eingeschaltet wird. Dabei ist es zur Vermeidung von Unterbrechungsfunken nützlich, wenn die Messingschiene so breit ist, dass sie stets mindestens mit einem Contactknopf in Berührung steht. Mittelst dieses Apparates kann man auch den Strom ohne Schaden unterbrechen, indem man durch Drehung der Kurbel zuerst grossen Widerstand einschaltet und dann erst (durch weiteres Drehen der Kurbel) den so vorläufig geschwächten Strom ganz unterbricht.

Fig. 682.



Die Wechselstrommaschine. Ausser den Dynamomaschinen mit gleichgerichtetem Strom benutzt man in der Elektrotechnik zur Erzeugung des elektrischen Lichtes auch vielfach Wechselstrommaschinen. **212**
Das Bedürfniss nach Wechselströmen wurde zuerst durch die Anwendung der Jablochkoff'schen Kerzen (§. 154) hervorgerufen; neuerdings erlangten die Wechselströme durch die Anwendung der später zu besprechenden Transformatoren eine erhöhte praktische Bedeutung. Der wesentliche Typus der Wechselstrommaschine ist bereits durch die Stöhrer'sche magnetoelektrische Maschine (§. 199), sowie durch den Siemens'schen Inductor (§. 201) gegeben, denn diese Apparate sind ursprünglich Wechselstrommaschinen und werden erst durch den Commutator zu Gleichstrommaschinen*).

*) Dies ist eigentlich auch bei den Maschinen nach Pacinotti-Gramme der Fall, insofern die Windungen des Ankers abwechselnd in entgegengesetzter Richtung durchströmt werden.

Wir können hier unmöglich alle die Wechselstrommaschinen, welche von Lontin, Gramme, Jablochkoff, Siemens-Halske, Müller

Fig. 683.

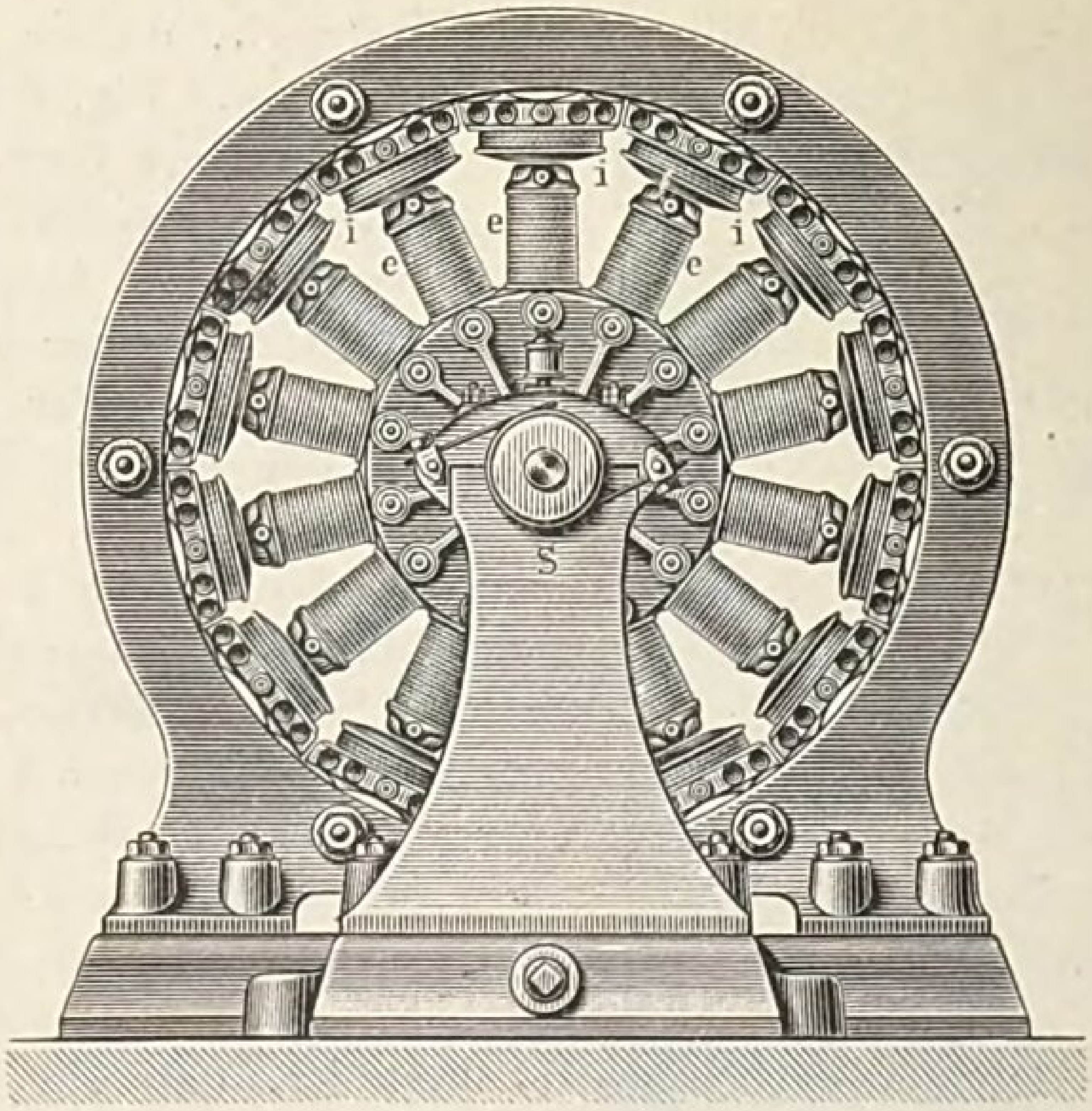
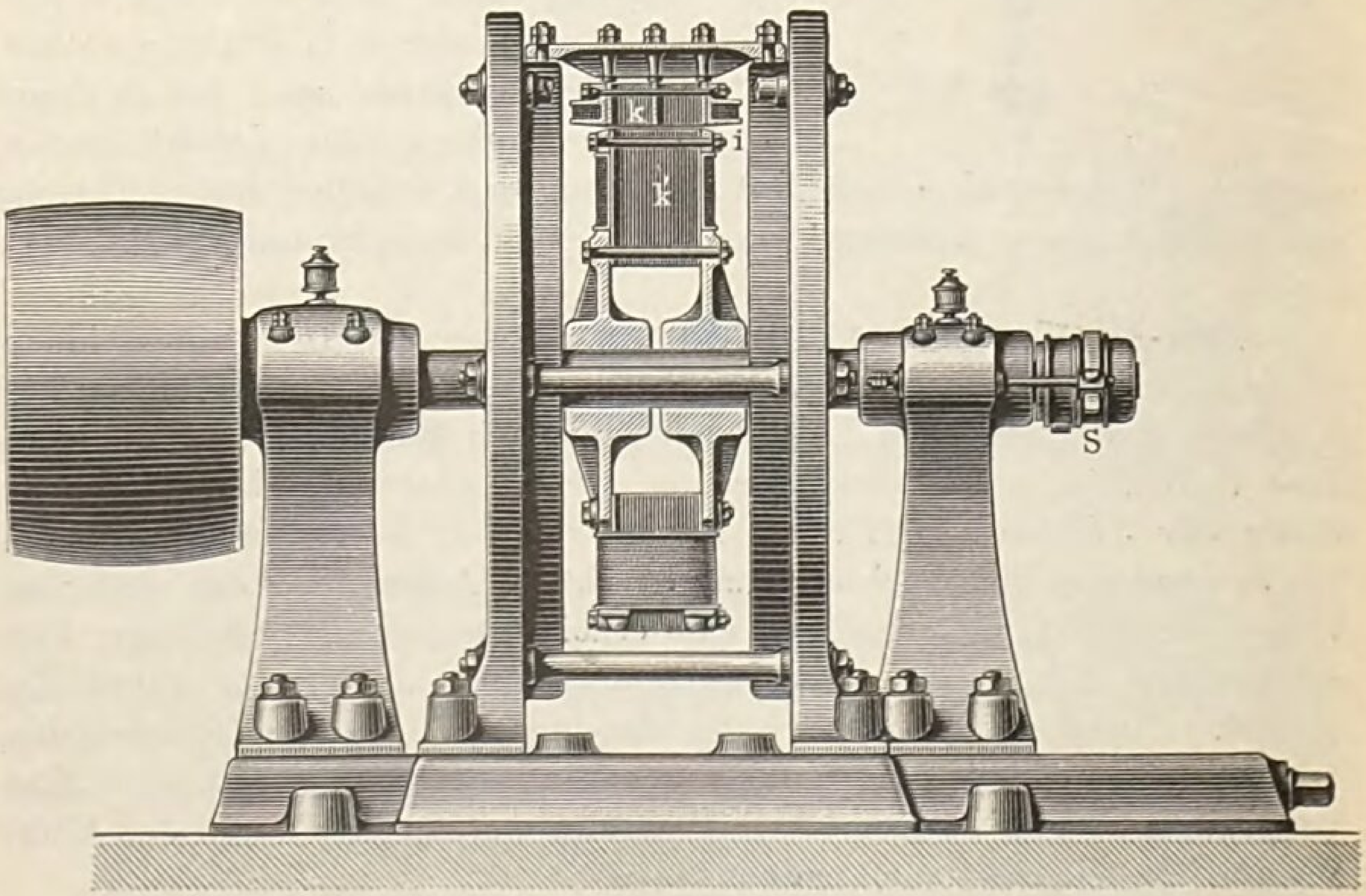


Fig. 684.



u. Levett, Lachaussée, Gordon, Ferranti-Thomson u. A. construirt worden sind, besprechen; wir beschränken uns auf die Be-

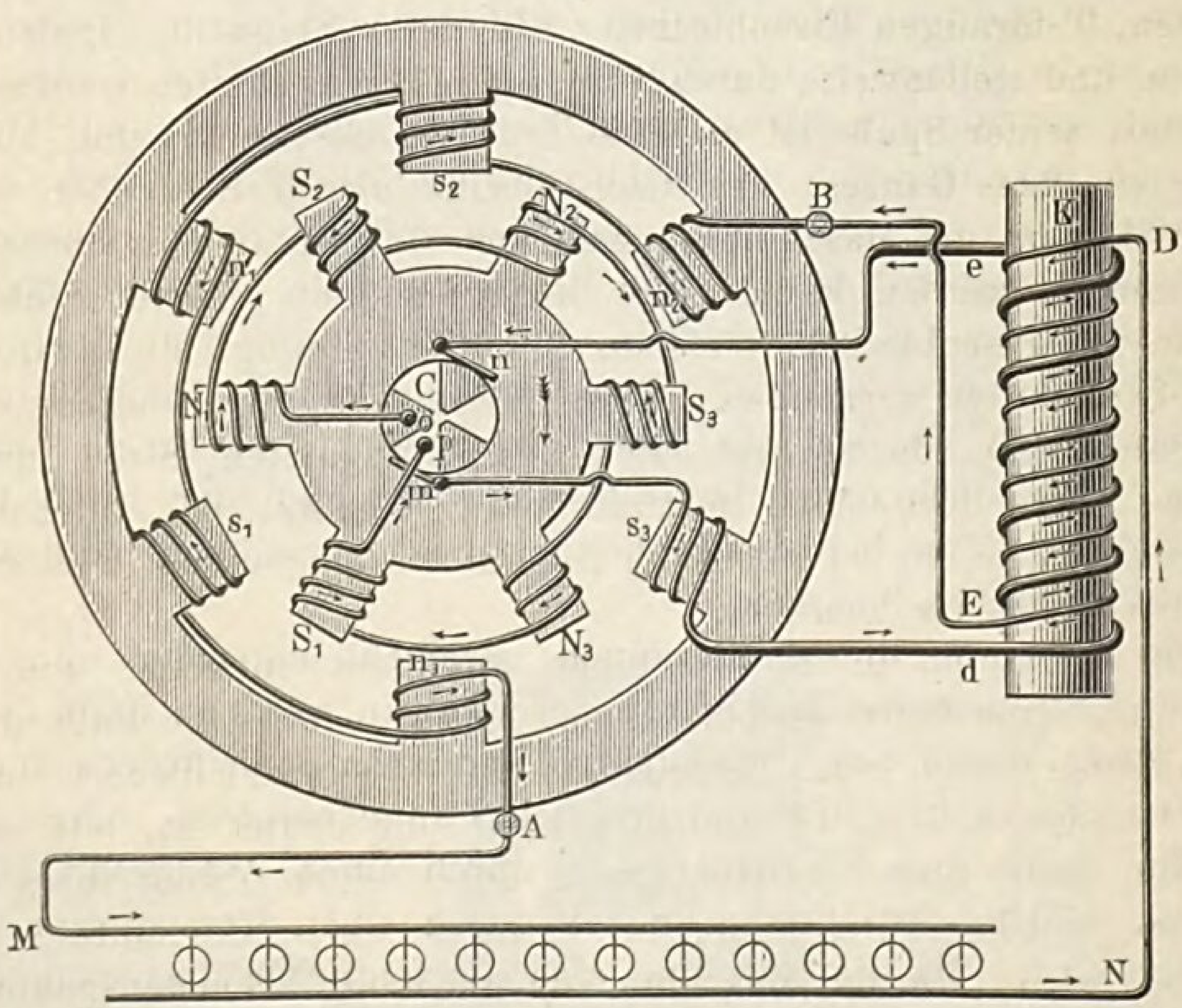
schreibung einer selbsterregenden Wechselstrommaschine mit Regulirung auf constante Spannung von der Firma Ganz & Comp. in Budapest, welche sich durch einen sehr hohen Wirkungsgrad und andere Vorzüge auszeichnet. Fig. 683 giebt eine Ansicht der Maschine von vorn, Fig. 684 eine Ansicht im Profil mit theilweisem Verticaldurchschnitt durch die wesentlichen Theile, endlich Fig. 685 (a. f. S.) eine schematische Darstellung der Schaltungsweise.

Diese Maschine besteht aus einer Anzahl feststehender Inductionsspulen $i, i, i \ldots$, Fig. 683 und 684, die im Kreise herum an einem Gestell radial angeordnet sind, und aus ebenso vielen Elektromagneten $e, e, e \ldots$, die einen innerhalb des Inductionsspulenmantels rotirenden Stern bilden. Die Inductionsspulen haben Kerne k, Fig. 684, aus zusammengepressten, isolirten, T-förmigen Eisenblechen, auf deren Stege die Spulen aufgeschoben und stellenweise durch Bronceklammern gehalten werden. Jeder Kern mit seiner Spule ist an eine Traverse geschraubt und bildet mit dieser ein fixes Ganzes, das nach Lösung zweier Schrauben von den Seitenschildern der Maschine abgenommen und untersucht, reparirt oder ausgetauscht werden kann. Die Elektromagnete sind gleichfalls mit Kernen aus Eisenblechen versehen, um die Bildung von Foucault'schen Strömen zu vermeiden. Diese Kerne erfahren nämlich zwar keinen Polwechsel, da sie von stets gleichgerichtetem Strom umflossen werden, aber doch einen fortwährenden Wechsel der Intensität des Magnetismus, da sie bald den Inductionsspulen gegenüber, bald zwischen dieselben zu stehen kommen.

Die Erregung dieser Maschinen geschieht entweder von aussen durch den Strom einer Gleichstrommaschine, in welchem Falle der erregende Strom durch zwei Schleifringe und zwei Schleiffedern zugeführt wird, wie dies in Fig. 683 und 684 bei S angedeutet ist, oder aber die Maschine speist ihre Elektromagnete durch einen Zweig ihres eigenen Stromes, welcher Zweigstrom zuvor durch einen Commutator gleichgerichtet wird. Da die Maschine eine constante Klemmenspannung behalten soll, so sind eigene Regulirungsvorrichtungen nothwendig. Bei der Maschine mit Aussenerregung geschieht dies dadurch, dass man den erregenden Gleichstrom mit Hülfe eines automatischen Widerstandsregulators ändert; bei Maschinen mit Selbsterregung hingegen geschieht dies durch einen Wechselstrominductor, den sogenannten Compensator K, Fig. 685. In dieser Figur ist die Wechselstrommaschine schematisch mit nur sechs Elektromagneten und Inductionsspulen dargestellt. Die Inductionsspule s_3, welche von den anderen Inductionsspulen separirt ist, liefert den erregenden Strom, welcher von dem Commutator C an den Bürsten n und m aufgenommen und als gleichgerichteter intermittirender Strom an die Stellen o und p abgegeben wird, von wo aus er die Windungen sämmtlicher Elektromagnete durchströmt. Diese sind so nach einander eingeschaltet, dass deren Polarität von einem zum nächsten wechselt, wie durch die beigeschriebenen Buchstaben S_1, N_1 . .

ersichtlich gemacht ist. Auch die Kerne der Inductionsspulen erhalten abwechselnd entgegengesetzte Pole s_1, n_1 Während aber die Pole S_1, N_1 ... durch den intermittirenden Gleichstrom immer wieder gleichnamig magnetisch werden, wechseln die Pole s_1, n_1 ... bei jedem Umgange der Maschine sechsmal ihren Magnetismus und eben so oft der sie umkreisende Strom seine Richtung. Der Commutator C, dessen unter sich leitend verbundene schraffirte Theile von den ebenfalls unter sich verbundenen nicht schraffirten Theilen isolirt sind, verwandelt den durch die Bürsten zugeführten Wechselstrom in aus der Figur ersichtlicher Weise in den intermittirenden Gleichstrom. Die gefiederten Pfeile deuten Verlauf und constante Richtung dieses Gleichstromes, die ungefiederten

Fig. 685.



Pfeile den Verlauf und die momentane Richtung des Wechselstromes an, wie sie der augenblicklichen Lage der Maschinentheile entspricht.

Der Compensator K besteht aus einem untertheilten Eisenkern, der mit zwei Bewickelungen versehen ist. Die Bewickelung DE des Inductors wird in den Hauptstrom (die Nutzleitung) geschaltet, die Bewickelung de in den Erregerstrom. Vermindert sich der Widerstand der Nutzleitung durch Einschaltung mehrerer paralleler Lampen zwischen M und N, so wird der Hauptstrom stärker; die Spannung an den Klemmen der Maschine würde daher geringer werden. Da aber der stärker gewordene Hauptstrom durch seine Inductionswirkung den erregenden Strom ebenfalls verstärkt, so wird hierdurch bei passenden Dimensionen des Apparates die Spannung wieder auf die ursprüngliche Höhe gehoben, also constant erhalten.

Die gebräuchlichsten Maschinen der Firma Ganz & Comp. haben eine Anzahl von Magnetpolen von 6 bis 40, machen dabei 830 bis 125 Touren per Minute und entsprechen einem Effect von 10000 bis 320000 Voltamp. Dabei gehen die Spannungen von 1000 bis 4000 Volt. Der commercielle (totale) Wirkungsgrad der Maschinen beträgt 85 bis 93 Proc. Die Anwendung dieser Maschinen zur elektrischen Beleuchtung mittelst der Transformatoren wird weiter unten besprochen werden.

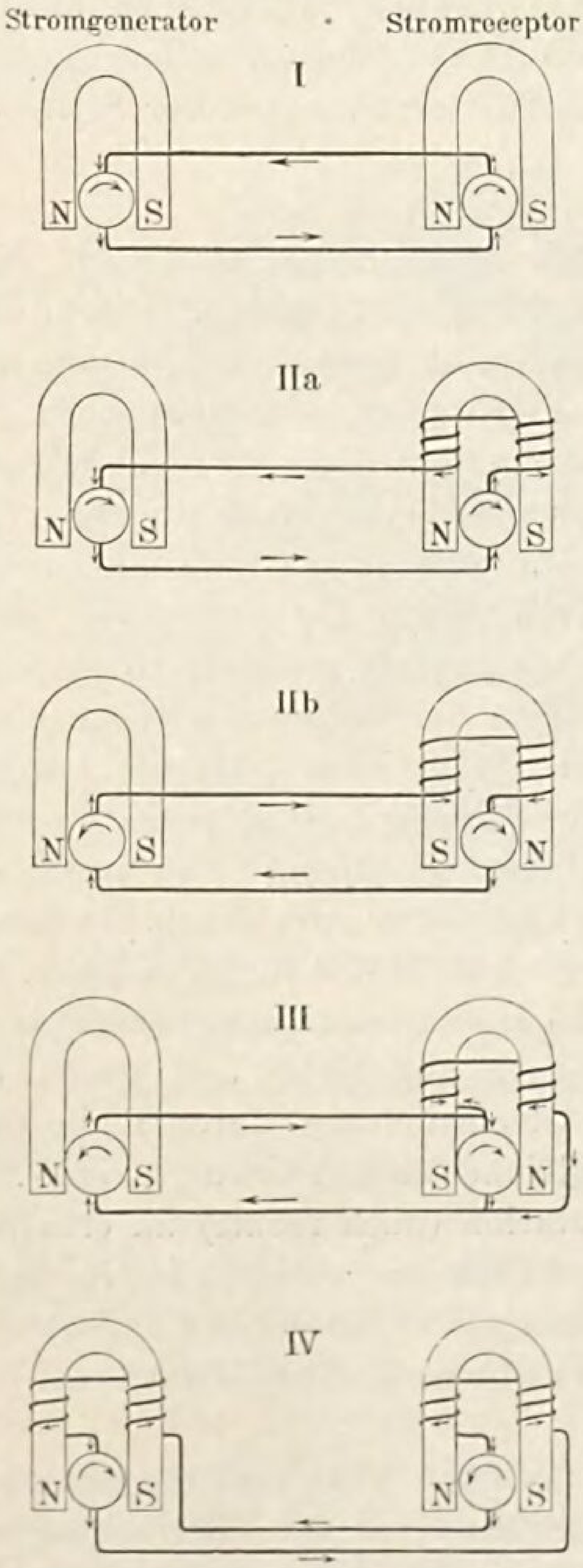
Zur Messung der (mittleren) Stromstärke der Wechselströme sind die gewöhnlichen Galvanometer oder Ampèremeter nicht zu gebrauchen. Statt dessen müssen Elektrodynamometer verwendet werden, welche auf der Einwirkung einer fixen Drahtrolle auf eine conaxiale bewegliche beruhen und welche wir ebenfalls erst an späterer Stelle beschreiben können.

Die magnetoelektrische und dynamoelektrische Maschine als Motor; elektrische Kraftübertragung. 213 Nach dem Gesetze von Lenz bringt jeder Strom in einem beweglichen System von Magneten und Stromleitern eine solche Bewegung hervor, welche für sich allein einen entgegengesetzten Strom erzeugen würde. Daraus folgt, dass, wenn man durch den Anker einer magnetoelektrischen Maschine einen Strom schickt, der Anker in eine solche Rotation geräth, welche für sich allein einen umgekehrten Strom hervorbrächte. Will man daher den Anker in demselben Sinne rotiren machen, in welchem er früher gedreht wurde, als er einen Strom lieferte, so muss man einen entgegengesetzten Strom hindurchleiten; man muss also die positive Polklemme der magnetoelektrischen Maschine mit dem positiven Pole einer Batterie oder einer anderen Maschine verbinden. Man nennt die stromerzeugende Maschine den Stromgenerator, die durch den Strom getriebene Maschine, welche nunmehr selbst als Motor fungiren kann, den Stromreceptor. In Fig. 686 I (a. f. S.) sind zwei magnetoelektrische Maschinen in ihrer Verbindung schematisch abgebildet und sowohl die Rotationsrichtungen der Anker als die Stromrichtung durch Pfeile dargestellt. Da die beiden Feldmagnete gleiche Magnetisirung zeigen, so muss, um an beiden Ankern gleiche Rotation (nach rechts) zu erhalten, der Strom im Generator von der oberen Bürste zur unteren, im Receptor umgekehrt geführt werden. Umkehrung der Rotation im Generator muss daher hier auch Umkehrung der Rotation im Receptor bewirken.

Anders verhält es sich, wenn der Receptor nicht eine magnetoelektrische, sondern eine dynamoelektrische Maschine ist. Betrachten wir zunächst eine solche mit normaler (Serien-) Schaltung, wie Fig. 686 II *a* darstellt. Die Maschinen seien so verbunden, dass der Feldmagnet der Dynamomaschine denselben Magnetismus erhält, wie der Feldmagnet der magnetoelektrischen Maschine hat und dass die beiden Anker entgegengesetzt durchströmt werden, wie im Falle I. Wir erhalten dann zu-

nächst gleiche Rotationen beider Anker, wie in I. Lassen wir aber nunmehr den Generator umgekehrt laufen, wodurch der Strom umgekehrt wird, so wird, wie Fig. 686 II *b* darstellt, auch der Magnetismus des Feldmagnets des Receptors umgekehrt. Da mithin in letzterem sowohl die Kraftlinien als die Stromrichtung das Zeichen wechseln, so bleibt die Rotationsrichtung der Dynamomaschine unabhängig von der Stromrichtung, wie ja auch, wenn die Maschine als Stromerzeuger wirkt, die Rotationsrichtung immer dieselbe zu bleiben hat, welches auch die Richtung des erzeugten Stromes ist. Die letztere hängt nur vom Zeichen des remanenten Magnetismus ab.

Fig. 686.



Betrachten wir jetzt den Fall III, wo der Receptor eine Nebenschlussmaschine ist. Kehren wir hier den Strom des Generators um, so wechseln ebenfalls sowohl Feldmagnetismus als Ankerstrom das Zeichen, mithin bleibt die Rotationsrichtung auch bei der Nebenschlussmaschine unabhängig von der Richtung des zugeführten Stromes. Dagegen besteht zwischen der normal geschalteten und der Nebenschlussmaschine der wesentliche Unterschied, dass erstere als Receptor stets die entgegengesetzte Rotationsrichtung hat als wenn sie als Generator fungirt, während die Nebenschlussmaschine als Receptor die gleiche Rotationsrichtung hat wie als Generator.

Fig. 686 IV zeigt die Strom- und Rotationsrichtungen zweier zusammen verbundener normal geschalteter Dynamomaschinen, in welchen der Strom beiderseits in Schenkeln und Anker gleich gerichtet ist. Die Rotationsrichtung des Receptors ist verkehrt mit jener des Generators. An diesem Verhalten würde sich nichts ändern, wenn die Verbindungsdrähte zwischen den Maschinen über Kreuz gewechselt würden, da sowohl Magnetismus als Stromrichtung im Receptor sich umkehren würden.

Auf der Verbindung zweier Dynamomaschinen, von denen eine als Stromgenerator, die andere als Stromreceptor und folglich als Motor wirkt,

beruht die elektrische Kraftübertragung. Selbstverständlich muss der Stromgenerator selbst durch einen Motor (Wasserrad, Dampfmaschine etc.) betrieben werden. Die Theorie der elektrischen Kraftübertragung ist im Wesentlichen folgende. Es bedeute:

E die elektromotorische Kraft der stromerzeugenden Maschine,

E' die elektromotorische Gegenkraft des Receptors, welche durch die entgegengesetzte Rotation desselben geweckt wird,

W den Gesammtwiderstand des ganzen Stromkreises,

J die Stromstärke während des Betriebes (Arbeitsstrom),

L den vom Stromerzeuger verbrauchten mechanischen Effect in Watt (oder Volt-Ampère),

L' den vom Receptor wieder gewonnenen mechanischen Effect (Nutzeffect) in Watt,

V den Effectverlust im ganzen Stromkreise von einer Maschine zur anderen.

Wir wollen zunächst zur Vereinfachung annehmen, dass bei der Umwandlung des mechanischen Effects in elektrischen und umgekehrt nichts verloren gehe.

Nach Joule's Gesetz ist:

$$V = WJ^2 = L - L'.$$
$$L = EJ, \qquad L' = E'J,$$

Nach Ohm's Gesetz gilt:

$$J = \frac{E - E'}{W},$$

durch Substitution folgt:

$$L = \frac{E(E - E')}{W}, \qquad L' = \frac{E'(E - E')}{W},$$
$$V = \frac{(E - E')^2}{W}.$$

Als Wirkungsgrad (Güteverhältniss) des ganzen Systems beider Maschinen werden wir das Verhältniss des von der zweiten Maschine abgegebenen Effects L' zu dem von der ersten Maschine aufgenommenen Effect L definiren, also Wirkungsgrad $\Gamma = \frac{L'}{L} = \frac{E'}{E}$.

Der Nutzeffect L' wird desto grösser, je grösser das Product $E'(E - E')$ wird. Der grösste Werth desselben entspricht der Bedingung:

$$E' = \frac{E}{2}.$$

Der Nutzeffect ist also am grössten, wenn die elektromotorische Gegenkraft der Maschine gleich der Hälfte der elektromotorischen Kraft des Stromerzeugers ist, wenn also die Stromstärke, wie sie durch den Generator allein zu Stande käme, durch die Gegenwirkung des Receptors auf die Hälfte herabgedrückt ist. Der Wirkungsgrad Γ ist für diesen Fall

$= 1/_2$. Das Maximum des Wirkungsgrades entspricht aber nicht diesem Falle, Γ nähert sich vielmehr seinem grössten Werthe 1 desto mehr, je näher $L' = L$, je kleiner also das Product WJ^2 ist, welches den Verlust darstellt. Man muss also vor Allem W möglichst klein machen. Da dies aber nur bis zu einer gewissen Grenze angeht, so muss man J möglichst klein machen, denn für $J = 0$ würde $\Gamma = 1$ werden. Dann wäre aber auch der Nutzeffect = Null. Soll der Nutzeffect, trotzdem man J möglichst klein macht, doch genügend gross ausfallen, so muss man den zweiten Factor E' im Product $L' = E'J$ möglichst gross machen. Daraus folgt, dass man, um möglichst hohen Wirkungsgrad zu erzielen, möglichst hohe Stromspannung anwenden muss,

Wäre es uns möglich, entweder den Widerstand einer Drahtleitung durch Vergrösserung des Querschnittes beliebig klein zu machen, oder die Stromspannung beliebig weit zu erhöhen, so könnten wir beliebig grosse Energiemengen mit geringem Verluste auf jede Entfernung auf elektrischem Wege übertragen. Das erste Mittel findet aber seine Grenze an den grossen Kosten der Leitung, das zweite an der Schwierigkeit der Isolirung, der grossen Gefährlichkeit und der Schwierigkeit der Herstellung von Dynamomaschinen mit hoher Klemmspannung. Man hat zwar schon Klemmspannungen bis zu 1500 Volt, ja in neuester Zeit bis 2000 Volt angewendet, wird aber in der Regel nicht weit über 1000 Volt hinausgehen.

Wir haben oben der Einfachheit wegen angenommen, dass die Maschinen keinen anderen Effectverlust erleiden, als der in ihnen entwickelten Joule'schen Wärme entspricht, welch letzteren wir unter V bereits mit in Rechnung gebracht haben.

Im §. 211 haben wir aber gehört, dass der absolute Wirkungsgrad stets geringer ist als der elektrische, d. h. von dem ganzen auf die Maschine übertragenen Effect geht bei der Umwandlung immer ein Theil für uns verloren und werden nur etwa 90 bis 95 Proc. wieder erhalten. Wir wollen, diesen „Transformationscoëfficienten" zu Grunde legend, ein (von Uppenborn gegebenes) Beispiel einer Kraftübertragung ausführen.

Es befinde sich im Orte A ein verfügbares Wassergefälle, von welchem auf elektrischem Wege bis zu einem 2 km entfernten Orte B Energie übertragen werden soll in solcher Menge, um daselbst eine Maschine von 40 Pferdekräften zu ersetzen. Da eine Pferdekraft = 736 Watt, so haben wir in B einen Effect von $40 \times 736 = 29440$ Watt hervorzubringen, wozu, wenn die Umwandlung ohne Verlust möglich wäre, dem daselbst aufgestellten Receptor 29 440 Voltamp. zugeführt werden müssten. Mit Rücksicht auf das Transformationsverhältniss von 90 Proc. brauchen wir aber $\frac{100}{90} \cdot 29440 = 32711$ Voltamp. Wenn wir nun noch festsetzen wollen, dass der Verlust durch den Widerstand der Lei-

tung nicht mehr als $1/_6$ des ihr zugeführten Effects, also $1/_5$ von 32 711 betragen soll, so berechnet sich derselbe zu $\frac{32\,711}{5} = 6542$ Voltamp. Der vom Stromgenerator in A abzugebende elektrische Effect muss also $32\,711 + 6542 = 39\,253$ Voltamp. betragen. Rechnen wir wieder 90 Proc. Transformationsverhältniss, so ist der in A dem Generator zuzuführende mechanische Effect $= \frac{100}{90}\,39\,253 = 43\,614$ Watt $= \frac{43\,614}{736}$ $= 59{,}26$ Pferdekräfte. Nehmen wir eine Maximalspannung $= 1000$ Volt an, so ergiebt sich die Stromstärke

$$J = \frac{39\,253 \text{ Voltamp.}}{1000 \text{ Volt}} = 39{,}25 \text{ Ampère.}$$

Der Widerstand der Leitung W ergiebt sich aus der Gleichung:

$$WJ^2 = \text{Effectverlust in der Leitung} = 6542,$$

also:

$$W = \frac{6542}{(39{,}25)^2} = \frac{6542}{1541} = 4{,}24 \text{ Ohm.}$$

Da die Leitung hin und zurück 4000 m lang ist, trifft es per Meter Leitungsdraht 0,00106 Ohm Widerstand, welchem ein Kupferdraht von 4,5 mm Durchmesser und 566 kg Gesammtgewicht entspricht. (Dabei ist auf Mängel in der Isolirung keine Rücksicht genommen.)

Der Stromgenerator ist so zu construiren, dass er 39,25 Amp. und 1000 Volt Klemmspannung zu leisten vermag. Der Stromreceptor hat 32 710 Voltamp. zu transformiren, muss also, als Generator betrieben, auf $\frac{32\,710}{39{,}25} = 833$ Volt Spannung neben 39,25 Amp. gebaut sein. Der Wirkungsgrad der ganzen Anlage ergiebt sich $\Gamma = \frac{40}{59{,}26} = 0{,}675$ oder 67,5 Proc. Es ist hier angenommen worden, dass die Betriebskraft verhältnissmässig billig sei und mehr an den Anlagekosten gespart werden soll. Wäre die Betriebskraft selbst theuer, so würde man den Wirkungsgrad auf Kosten einer theureren Anlage steigern, indem man den Leitungsdraht dicker nähme.

Zu den interessantesten aber auch schwierigsten Problemen der elektrischen Kraftübertragung gehört die elektrische Eisenbahn, bei welcher der Strom nicht durch mitgeführte Batterien oder Accumulatoren, sondern von einer in der Station aufgestellten Dynamomaschine gewonnen und längs der isolirten Schienen oder auf besonderen Leitern dem den Receptor enthaltenden Waggon zugeführt wird. Der letztere überträgt dann die zugeführte elektrische Energie als mechanische auf die Räder. Wie W. Siemens, der Erfinder der elektrischen Bahn, gezeigt hat, findet dabei eine günstige Regulirung der Stromstärke durch die wechselnde Geschwindigkeit des Waggons statt. Fährt derselbe nämlich auf-

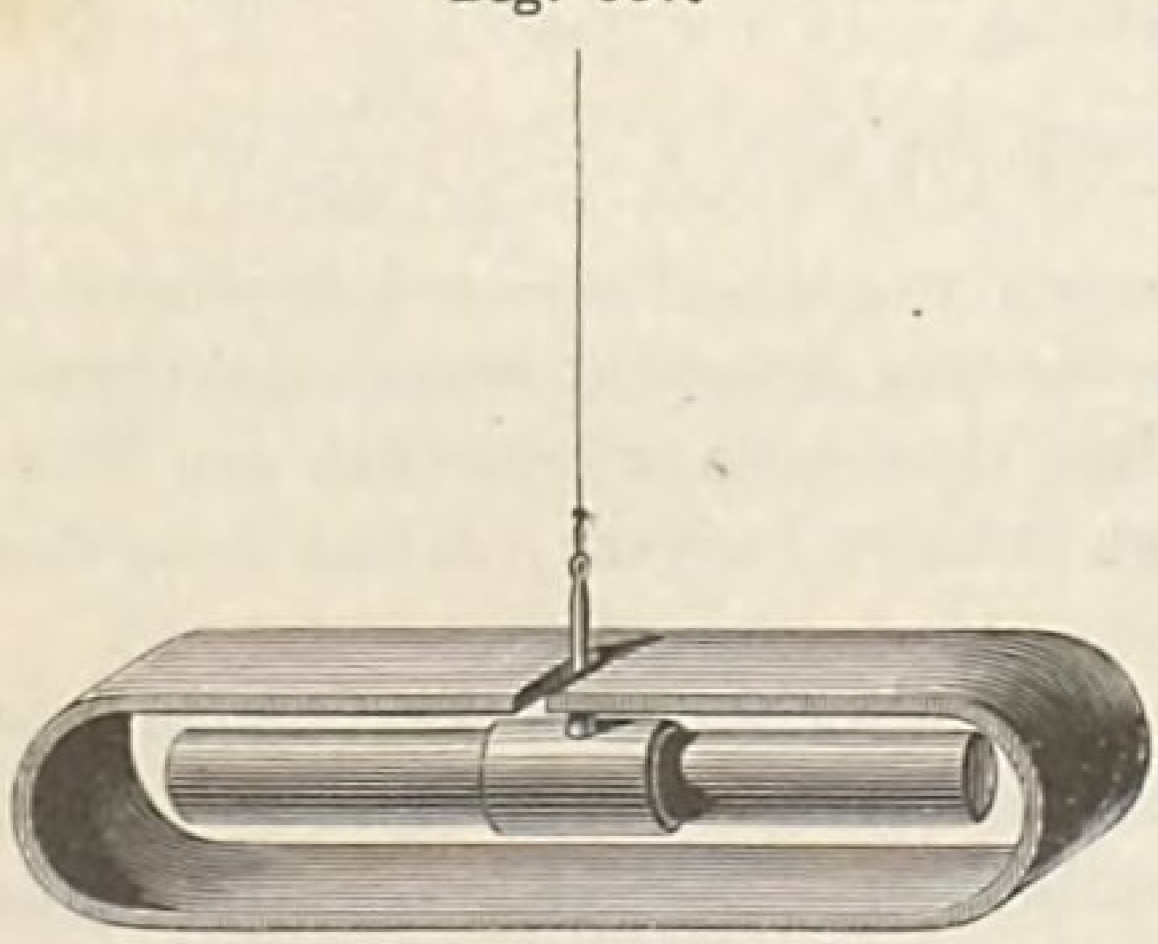
wärts, so ermässigt sich die Geschwindigkeit seiner Räder, also auch die des Receptors, die elektromotorische Gegenkraft desselben wird daher geringer, die Zugkraft daher grösser. Käme umgekehrt der Waggon im Abwärtsfahren in zu grosse Geschwindigkeit, so würde die Gegenkraft zunehmen, die Zugkraft daher vermindert werden, oder gar negativ werden und dann als Bremse wirken. Im letzteren Falle übernimmt also der Receptor die Rolle eines Generators und wirkt auf die Maschine der Station aufhaltend zurück.

Bezüglich der mannigfaltigen Anwendungen der elektrischen Kraftübertragung müssen wir auf die Arbeiten von Deprez, Frölich u. A. verweisen; eine eingehendere mathematische Theorie derselben ist von R. Clausius*) gegeben worden.

214 **Dämpfung durch Inductionsströme, Foucault'sche Ströme, Arago's Rotationsmagnetismus.** Wir haben schon mehrmals das Princip von Lenz erwähnt, nach welchem jeder durch eine Bewegung erzeugte Inductionsstrom selbst die entgegengesetzte Bewegung hervorzurufen, also diejenige Bewegung zu hemmen strebt, durch welche er entstanden ist. Diese Wirkung erfolgt nicht allein in geschlossenen Drahtwindungen, sondern überhaupt in jedem Leiter, in dessen Nähe ein Magnet sich bewegt, werden Ströme inducirt, welche hemmend auf seine Bewegung wirken. Diese unter Anderem von Foucault studirten Inductionsströme werden häufig Foucault'sche Ströme genannt.

Lässt man einen an Seidenfäden aufgehängten Magnetstab einmal vollkommen frei, dann aber wieder umgeben von einem kupfernen Bügel,

Fig. 687.



wie es in Fig. 687 dargestellt ist, oscilliren, so wird bei gleichem ursprünglichen Ausschlagswinkel der Magnetstab im letzeren Falle weit eher zur Ruhe hommen, d. h. die Oscillationen werden weit schneller aufhören, als wenn der kupferne Bügel fehlt. Darauf gründet sich die Anwendung kupferner Dämpfer, mit welchen der Magnet der in §. 142 besprochenen Spiegelgalvanometer, Fig. 406 bis 419, umgeben ist.

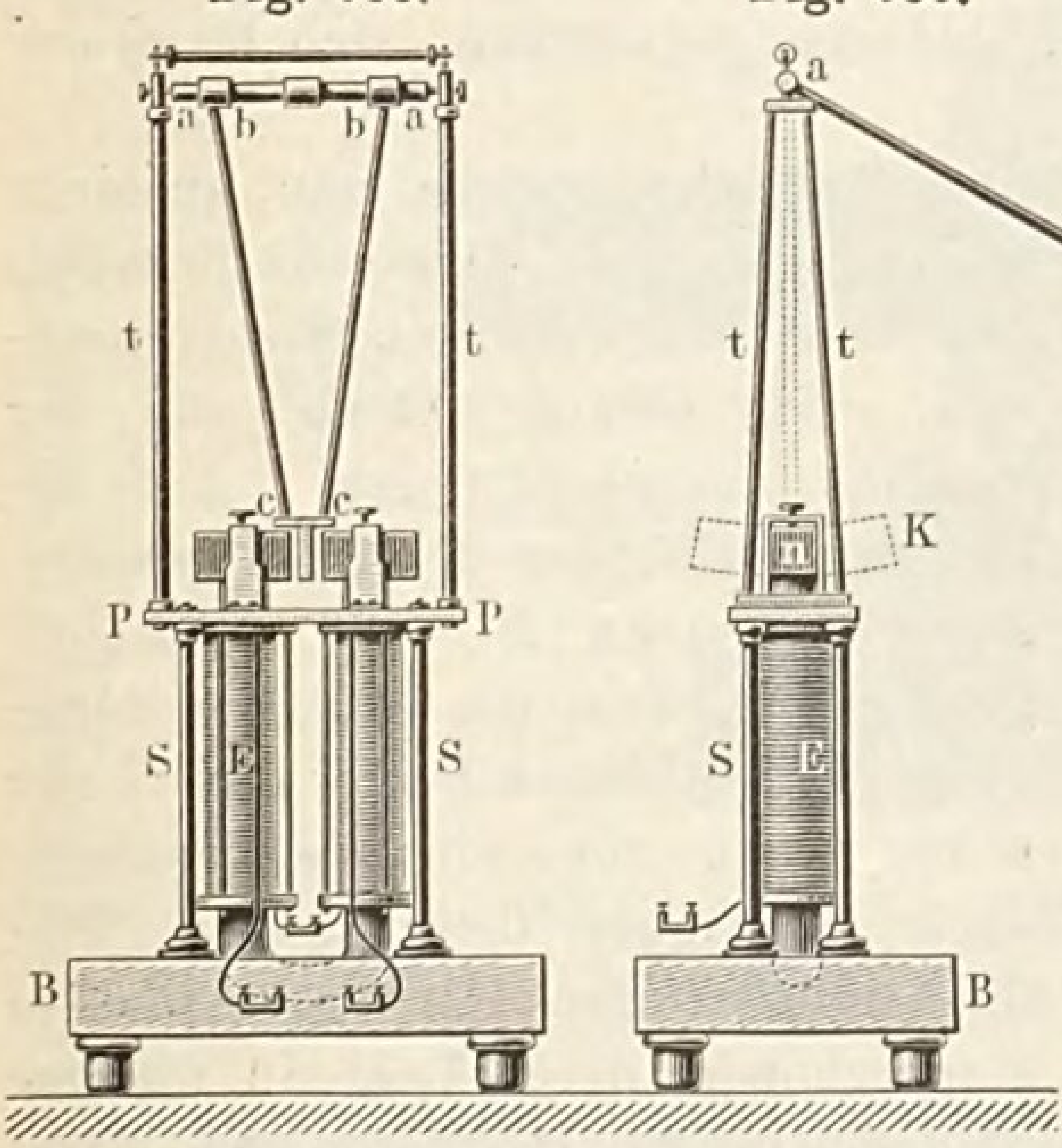
Die Induction von Strömen und die Rückwirkung derselben auf den inducirenden Magnet erfolgt aber auch ganz in gleicher Weise, wenn ein beweglicher Leiter in der Nähe eines festen Magnets bewegt wird. Auch hier wirken die inducirten Ströme im bewegten

*) Wiedem. Ann. XXI, S. 385 (1884).

Leiter und die Ampère'schen Ströme des Magnets (oder Elektromagnets) hemmend auf die Bewegung des Leiters, wie sich dies sehr auffallend in folgendem, von Faraday herrührenden Versuche zeigt. Man hänge eine massive Kugel von Kupfer zwischen den beiden Polen eines kräftigen Elektromagnets an einem Faden auf, den man durch vielfache Drehung um seine eigene Axe stark tordirt. Ueberlässt man dann die Kugel sich selbst, während der Strom noch nicht die Windungen des Elektromagnets durchläuft, so fängt dieselbe an, rasch um ihre verticale Axe zu rotiren, sie steht aber augenblicklich still, sobald man den Elektromagnet in Thätigkeit setzt. Um dies dem Auditorium besser ersichtlich zu machen, befestigt man ein helles Federchen an der Kugel und lässt diese recht nahe zwischen den Polfortsätzen (Halbankern) des Magnets rotiren.

Benutzt man eine Kugel, welche aus von einander isolirten Scheiben zusammengesetzt ist, so ist die Dämpfung eine viel geringere, weil die Inductionsströme in geringerem Maasse zur Ausbildung gelangen. Ein Rechteck aus Kupferdraht, das an einer Stelle durchschnitten ist, wird bei der Rotation nicht gehemmt. Dies tritt aber sofort ein, sobald man die Trennungsstelle leitend überbrückt. Eine Drahtfigur in Form einer 8 erfährt keine Hemmung, so lange die Drähte an der Kreuzungsstelle ohne Contact sind, weil der in der einen Kreishälfte zu Stande kommende Inductionsstrom in der anderen Kreishälfte eine zum Magnetfelde entgegengesetzte Richtung hat, wodurch die hemmende Wirkung compensirt wird.

Fig. 688. Fig. 689.



Recht auffallend zeigt sich die dämpfende Wirkung an dem von A. v. Waltenhofen construirten „Inductionspendel“, von welchem die Fig. 688 und 689 Abbildungen geben. Die Schenkel eines mit seiner Wölbung in ein festes Grundbrett eingelassenen Elektromagneten EE durchsetzen eine auf vier Säulen S ruhende messingene Platte PP, auf welcher die Träger tt der Pendelaxe aa befestigt sind. Diese ist zwischen Spitzen beweglich, welche mittelst Schraubenmuttern in der richtigen Stellung festgeklemmt werden können. Die Pendelstange besteht aus dem Rahmen $bbcc$, welcher anstatt einer Pendellinse ein Flachringsegment kk aus Kupfer von 1 cm Dicke trägt. Auf die Pole werden

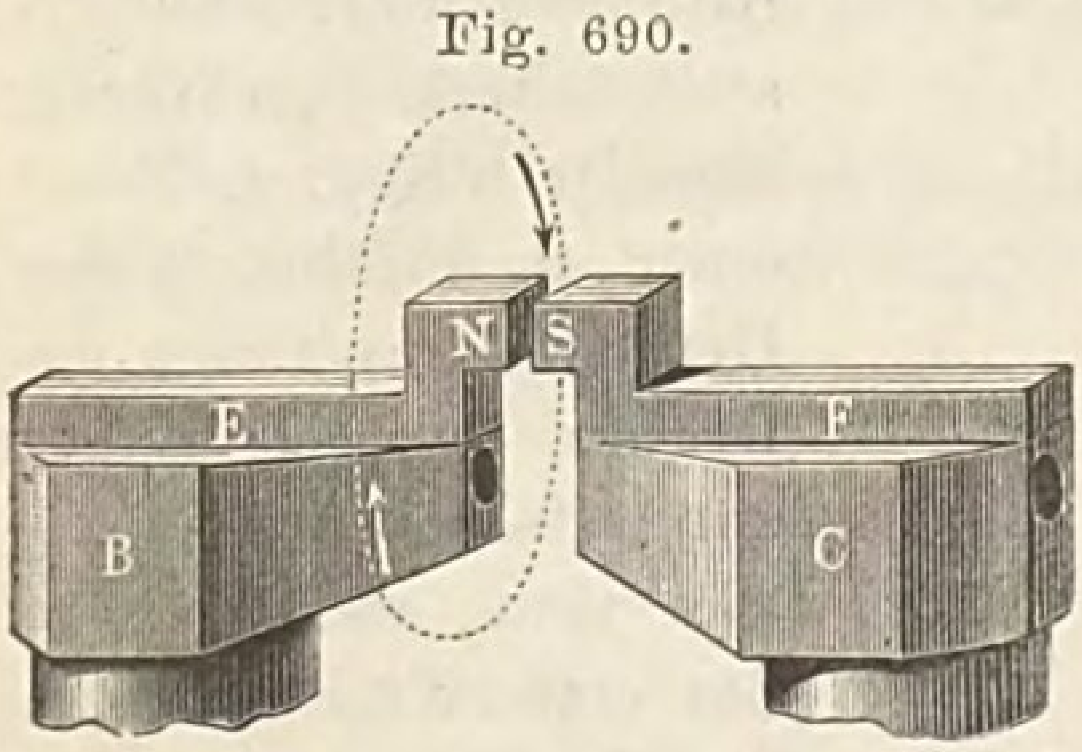
prismatische Polschuhe n aufgesetzt und in der aus der Figur ersichtlichen Weise in passendem Abstande festgeschraubt, so dass das Kupfersegment mit einem Spielraum von 1 bis 2 mm auf beiden Seiten hindurchschwingen kann.

Giebt man dem Pendel eine grosse Elongation und lässt es schwingen, so lange der Elektromagnet noch stromlos ist, so zeigt sich nur eine geringe Abnahme der Schwingungsbogen in Folge der Reibung. Dieselben nehmen aber rasch ab, sobald nur ein schwacher Strom hindurchgeleitet wird. Bei stärkerem Strom wird das Pendel fast plötzlich aufgehalten und geht nur langsam in die Ruhelage über.

Ein von V. v. Lang angegebenes Experiment ist folgendes. Zwischen den Polen des Elektromagnets und in senkrechter Lage zu dessen Kraftlinien wird eine lange Messingschraube mit darüber geschraubter cylindrischer Schraubenmutter aus Kupfer mittelst eines Schnurlaufs in Rotation versetzt. Ist der Magnet nicht geladen, so dreht sich die Schraubenmutter sammt der Schraube. Sobald man aber den Strom schliesst, wird die Schraubenmutter durch die Dämpfung verhindert, sich mit der Schraube zu drehen und dadurch gezwungen, sich längs der letzteren zu verschieben.

Foucault brachte eine kupferne Scheibe, welche man, an einer Kurbel drehend, durch Vermittelung von Zahnrädern in rasche Rotation versetzen konnte, zwischen die beiden Pole eines kräftigen Elektromagnets. Fig 690 deutet an, wie der Versuch anzustellen ist. Auf die eisernen Halbanker B und C werden die Eisenstücke E und F so aufgeschraubt, dass die einander zugewendeten Polflächen bei N und S nur 6 bis 8 mm von einander entfernt sind. Zwischen diese beiden Polflächen wird nun die Kupferscheibe eingeschoben, deren Lage in unserer Figur durch einen punktirten Kreis angegeben ist. Das Räderwerk kann ungefähr so eingerichtet sein, dass auf eine Umdrehung der Kurbel 8 bis 12 Umdrehungen der Scheibe kommen.

Fig. 690.

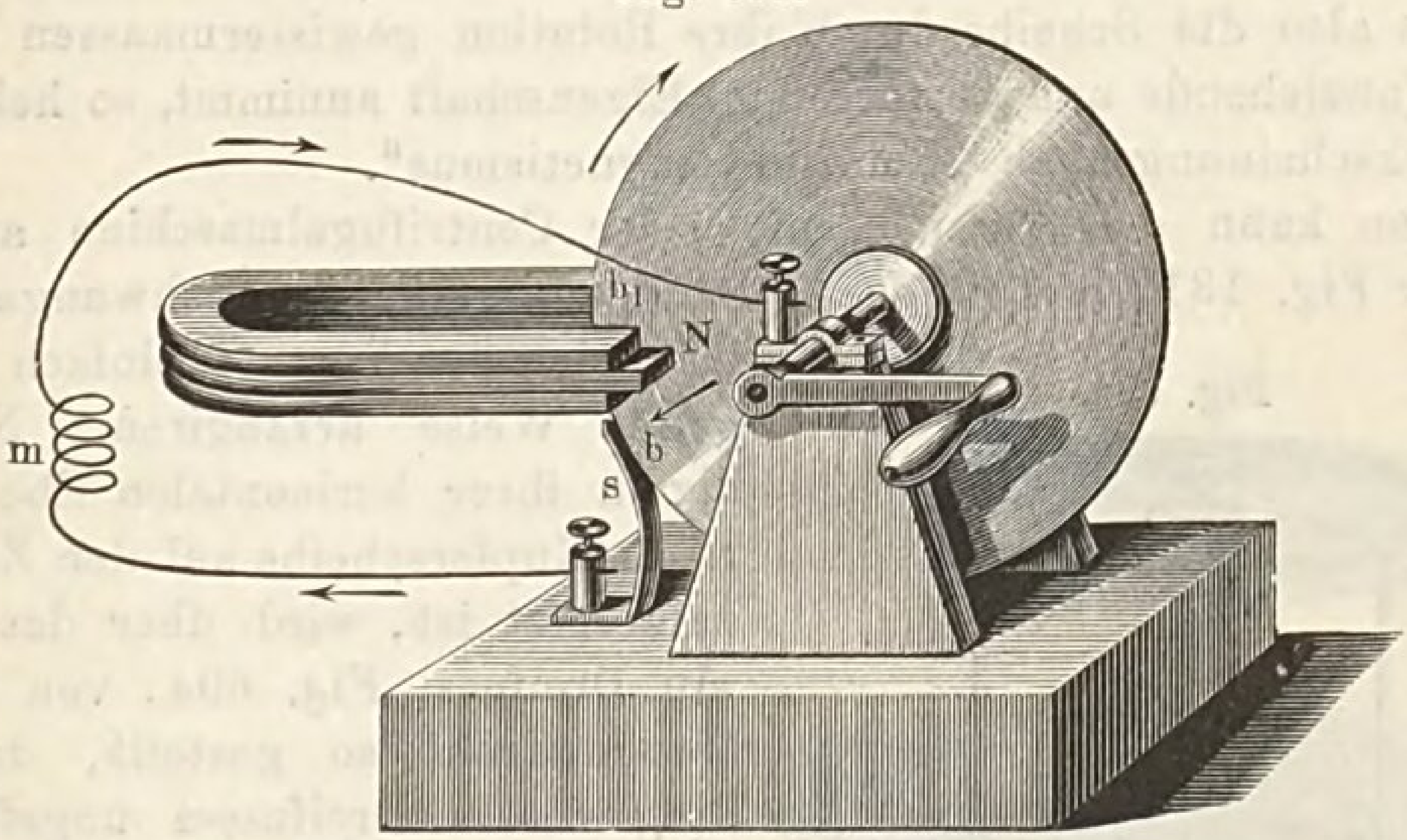


So lange nun der Elektromagnet nicht in Thätigkeit gesetzt ist, kann man ohne grosse Mühe die Kupferscheibe in rasche Rotation versetzen. Sobald man aber einen Strom durch die Windungen des Elektromagnets gehen lässt, fühlt die Hand, welche an der Kurbel arbeitet, einen bedeutenden Widerstand, und nur mit relativ grosser Kraftanstrengung kann man die Drehung der Scheibe bewirken. Die Reaction zwischen dem Magnet und der rotirenden Scheibe wirkt also wie die Reibung als Hinderniss der Bewegung. Man kann übrigens auch ohne Räderwerk einfach mit der Hand eine Kupferplatte zwischen den Polen in Bewegung setzen und fühlt daselbst sehr deutlich die auftretende

Hemmung, welche täuschend den Eindruck macht, als wenn man die Kupferscheibe in eine zähe Flüssigkeit getaucht hätte. Wenn man mit Anstrengung die rotirende Bewegung der Scheibe zwischen den Magnetpolen eine Zeit lang unterhält, so erwärmt sich die Scheibe nach und nach, und zwar kann ihre Temperatur auf diese Weise bis über 90° gesteigert werden.

Dass in der Kupferscheibe wirklich Inductionsströme erregt werden, kann mittelst des von Faraday angegebenen Versuches, Fig. 691, nachgewiesen werden. Wenn man die Metallfeder *s*, welche in der Nähe der Magnetpole gegen den amalgamirten Rand der Kupferscheibe drückt, mit der metallenen Axe der Scheibe durch eine Drahtleitung verbindet, und in dieselbe einen Multiplicator einschaltet, wie dies in unserer Figur bei *m* schematisch angedeutet ist, so weicht die Nadel des Multiplicators aus, sobald die Scheibe rotirt, und zwar hängt die Richtung der Ablenkung von der Richtung der Rotation ab; einmal nämlich zeigt die Nadel

Fig. 691.



einen Strom an, welcher von der Mitte der Scheibe zum Rande geht, bei entgegengesetzter Drehungsrichtung einen Strom vom Rande nach der Mitte.

Man erkennt sofort, dass dieses Experiment als Umkehrung des Barlow'schen Experimentes (§. 194) aufgefasst werden kann. Damit ist auch seine Erklärung gegeben. Beim Barlow'schen Rade wird durch den Strom die Rotation, hier durch die Rotation der Strom erzeugt.

Wenn auf die mechanisch gedrehte Scheibe nicht die beiden Magnetpole *S* und *N*, sondern nur einer derselben einwirkte, so würde die Erscheinung bis auf die Intensität der Wirkung ganz die gleiche gewesen sein.

In dem oben durch Fig. 691 erläuterten Inductionsversuch waren die Inductionsströme dadurch nachgewiesen worden, dass ausserhalb der Scheibe eine metallische Verbindung zwischen ihrer Axe und einem Punkt ihres Randes durch eine Drahtleitung hergestellt worden war, in welche der Multiplicator eingeschaltet wurde. Wenn aber auch diese Drahtleitung ganz fehlt, so hört deshalb die Induction der Ströme in der

mechanisch gedrehten Scheibe nicht auf, nur werden dieselben, da sie nicht durch eine Drahtleitung aus der Scheibe abgeleitet werden, innerhalb derselben ihren Weg vollenden müssen; die Scheibe wird von Strömen durchlaufen, ungefähr wie es Fig. 692 zeigt.

Fig. 692.



Fig. 693.



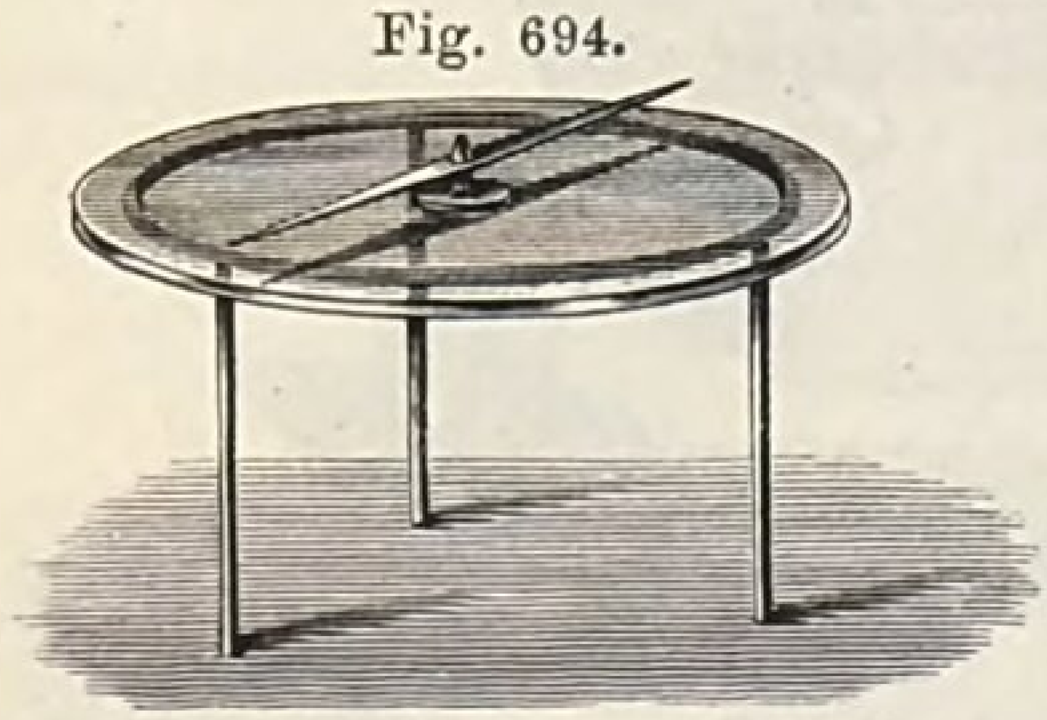
Fig. 693 zeigt den ungefähren Verlauf der Ströme, welche in einer um ihren Mittelpunkt rotirenden Scheibe inducirt werden, wenn die beiden Pole des inducirenden Magnets den Punkten a und b gegenüberstehen.

Wenn eine Kupferscheibe in der Nähe eines leicht beweglichen Magnets rotirt, so wird die Reaction zwischen der Scheibe und dem Magnet den letzteren selbst in Bewegung setzen, wie dies in der That von Arago beobachtet worden ist, als er unter einer in horizontaler Ebene drehbaren Magnetnadel eine horizontale Kupferscheibe um ihre verticale Axe rotiren liess.

Da also die Scheibe durch ihre Rotation gewissermaassen magnetische (anziehende und abstossende) Eigenschaft annimmt, so heisst man diese Erscheinung auch „Rotationsmagnetismus“.

Man kann den Versuch mit jeder Centrifugalmaschine anstellen. Mit der Fig. 131, S. 159 des 1. Bandes abgebildeten Schwungmaschine lässt sich der Versuch einfach auf folgende Weise arrangiren. Nachdem die in ihrer horizontalen Ebene rotirende Kupferscheibe auf den Zapfen A aufgesetzt ist, wird über das Gestell ein Dreifuss, Fig. 694, von starkem Messingdraht so gestellt, dass der Ring dieses Dreifusses ungefähr die Kupferscheibe umgiebt. Auf diesen Ring wird dann eine Glasscheibe gelegt, auf welche man endlich die auf einer niedrigen Spitze spielende Magnetnadel aufsetzt.

Fig. 694.



Die Erscheinungen, welche man mit diesem Apparate beobachtet, sind folgende. Wenn Alles in Ruhe ist, stellt sich die Nadel in den magnetischen Meridian. Fängt man nun an zu drehen, so wird die Nadel in der Richtung abgelenkt, nach welcher sich die Scheibe dreht. Die Kraft also, welche die Nadel fortzieht, wirkt der magnetischen Kraft der Erde entgegen, welche die Nadel in den magnetischen Meridian zurückzuführen strebt; je nach dem Verhältnisse dieser beiden Kräfte findet eine bestimmte Gleichgewichtslage für die Nadel statt. Die ablenkende Kraft der Scheibe wächst mit der Geschwindigkeit; bei einer geringen Geschwindigkeit wird also die Nadel z. B. eine Ablenkung von 10^0 erleiden und in dieser Lage stehen bleiben; bei einer grösseren Geschwindigkeit wird die Ablenkung 20^0 betragen etc. Man kann es auf

diese Weise dahin bringen, dass die Nadel bei jeder beliebigen Neigung gegen den magnetischen Meridian von 0^0 bis 90^0 stehen bleibt, je nachdem man der Scheibe eine grössere oder geringere constante Geschwindigkeit ertheilt. Sobald aber die Geschwindigkeit einmal gross genug ist, um die Nadel um mehr als 90^0 abzulenken, giebt es keine Ruhelage für die Nadel mehr, die Nadel dreht sich nun mit der Scheibe.

Die Intensität der Wirkung, welche die rotirende Scheibe auf die Nadel hervorbringt, nimmt mit der Entfernung ab.

Nimmt man statt des Kupfers Scheiben von einem anderen Metall, so nimmt die Stärke der Wirkung mit der Leitungsfähigkeit des Metalles ab.

Wenn die Scheibe in der Richtung der Radien eingeschnitten ist, so verliert sie ihre Wirksamkeit fast ganz; wenn man aber die Einschnitte der kupfernen Scheibe nur am Rande mit einem beliebigen Metalle, selbst mit Wismuth, wieder zulöthet, so wird die verlorene Wirksamkeit zum Theil wieder hergestellt.

Sechstes Capitel.

Wechselwirkung zwischen Strömen und Stromleitern.

215 **Die Kraftlinien der Ströme und Stromkreise; Anziehung und Abstossung paralleler Ströme.** Da elektrische Ströme auf Magnete influenzirend und bewegend einwirken, so muss das von ihnen hervorgebrachte magnetische Feld auch durch ein System von Kraftlinien und Niveauflächen darstellbar sein. Da wir wissen, dass sich eine frei bewegliche Magnetnadel stets in die Richtung einer Kraftlinie stellt, so können wir aus der bekannten Einwirkung, welche eine solche Nadel von Seiten eines geradlinigen Stromes erfährt, leicht erschliessen, dass die Kraftlinien des letzteren lauter conaxiale Kreise sein müssen, deren Ebenen senkrecht auf der Stromaxe stehen. Die Magnetnadel stellt sich ja (vom Erdmagnetismus abgesehen) stets in die Richtung der Tangente eines solchen Kreises. Die Niveauflächen stehen überall senkrecht auf den Kraftlinien, werden also hier durch Ebenen dargestellt, welche in gleichen Winkelabständen durch die Stromaxe hindurchgelegt sind. Definiren wir die Stromstärke J nach absolutem Maasse und setzen wieder fest, dass an jedem Orte, wo die magnetische Intensität $= 1$ ist, auch je eine Kraftlinie durch die Flächeneinheit gehe, so ergiebt sich daraus auch Anzahl und Vertheilung der Kraftlinien. Wir beschränken uns hier darauf, durch das Experiment zu zeigen, dass die Kraftlinien die Form concentrischer Kreise haben. Durch den dicken Kupferdraht *ab*, Fig. 695, welcher durch eine Oeffnung in einem horizontalen mit Eisenpulver bestreuten Stück Kartenpapier hindurchgeht, führen wir einen möglichst starken Strom (mindestens 10 Amp.) und erschüttern ein wenig das Blatt. Man erhält dann eine Zeichnung, welche in Fig. 696 nach einem Originale abgebildet ist. Die Pfeile (Fig. 695) geben die zusammengehörigen Richtungen des Stromes und der Kraftlinien an.

Sind nun zwei parallele Leiter einander genähert, Fig. 697, welche in derselben Richtung durchflossen werden, so ersieht man sofort aus

dem Verlauf ihrer Kraftlinien, dass sie sich anziehen müssen; denn denken wir uns Magnetnadeln in die Richtung der benachbarten Kraftlinien gelegt, so liegen diese mit entgegengesetzten Polen an einander. Fig. 698 zeigt ebenso, dass entgegengesetzt gerichtete parallele Ströme sich abstossen müssen und Fig. 699 lässt erkennen, dass die auf einander folgenden Strecken eines und desselben Stromes abstossend auf einander

Fig. 695.

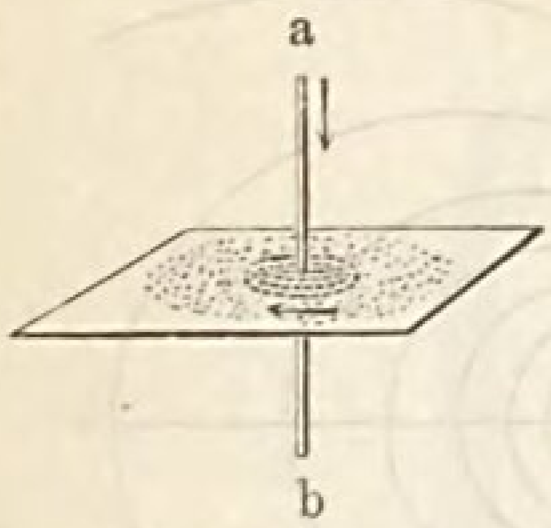
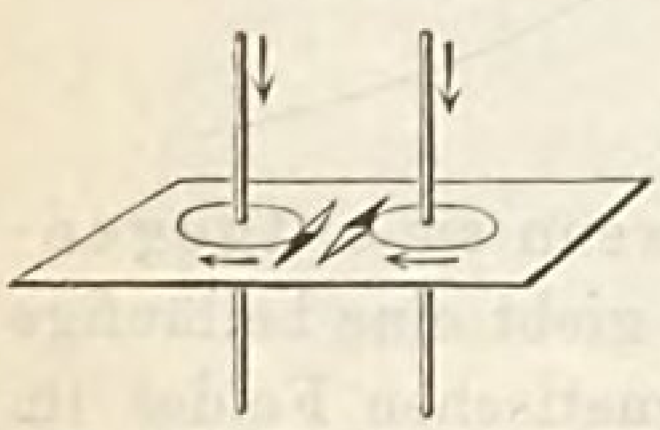


Fig. 696



Fig. 697.



wirken müssen. Begreiflicherweise verlaufen die Kraftlinien zweier Ströme nicht ungestört neben einander. In analoger Weise, wie in der

Fig. 698.

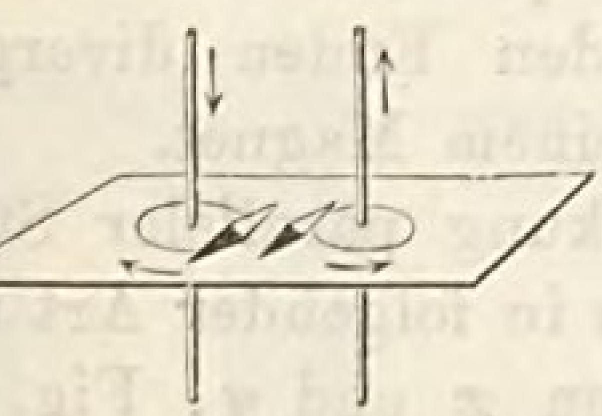


Fig. 699.

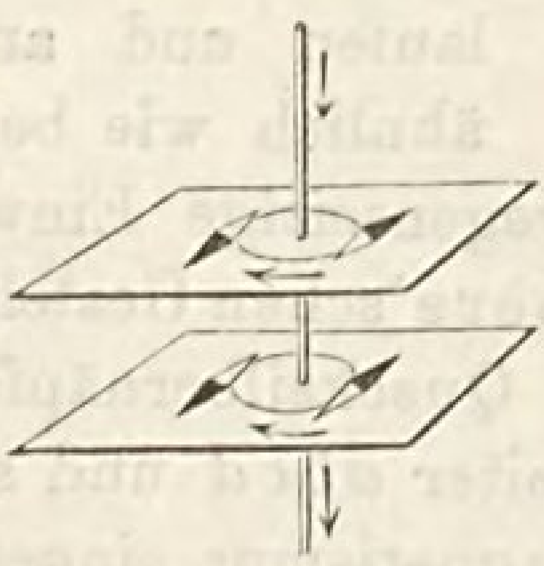


Fig. 700.

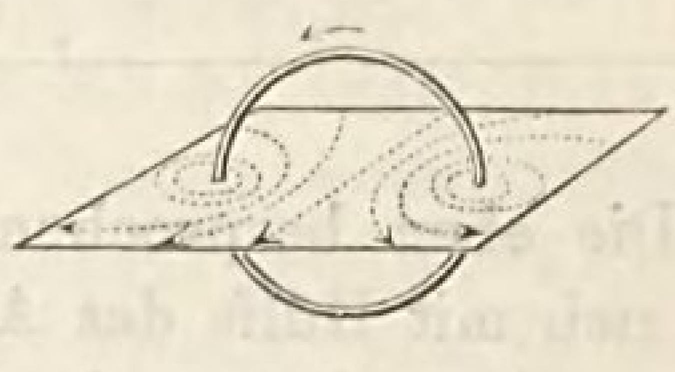
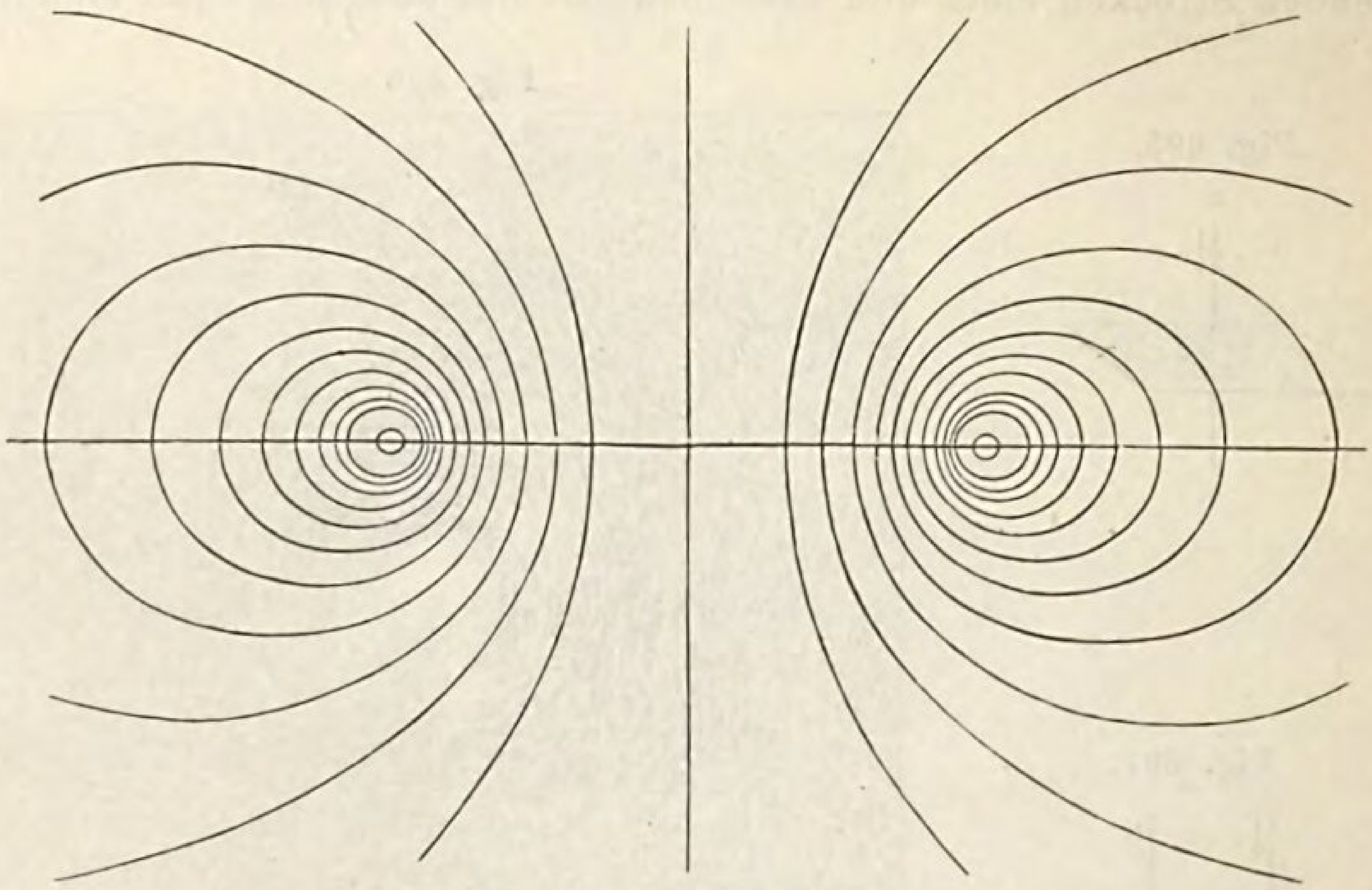


Fig. 80 *a* und *b*, S. 92, die Kraftlinien der entgegengestellten Pole in einander übergehen oder aber sich ausweichen, muss dies auch in den Fällen der Fig. 697 u. 698 der Fall sein. Haben wir nun einen Stromring, wie in Fig. 700 dargestellt ist, so müssen die Kraftlinien daselbst ähnlich verlaufen, wie im Falle der Fig. 698. Sie stossen sich gegenseitig ab und drängen sich gewissermaassen gegenseitig in der Richtung des Ringdurchmessers aus einander.

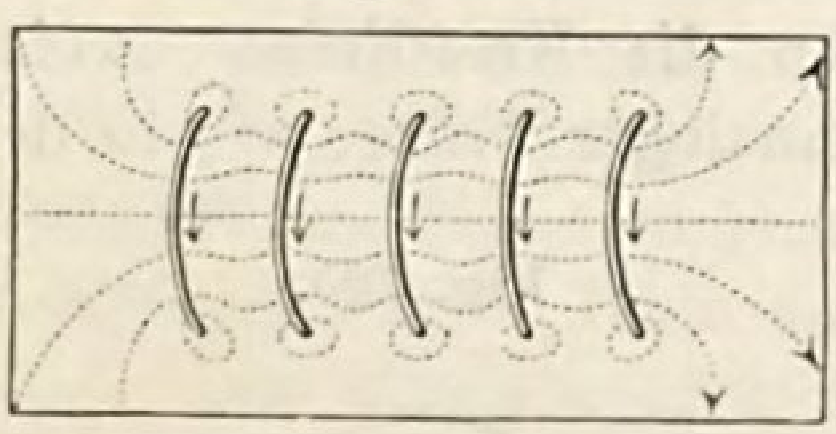
Die Fig. 701 giebt eine genauere Darstellung des magnetischen Feldes eines Kreisstromes *). Man kann aus derselben nicht allein entnehmen, wie ein solcher Kreisstrom auf einen Magnet wirkt, sondern auch, wie zwei Kreisströme auf einander wirken; nämlich **anziehend**,

Fig. 701.



wenn sie in **gleicher Richtung**, **abstossend**, wenn sie **entgegengesetzt** durchflossen werden. Die Fig. 702 endlich giebt eine beiläufige Darstellung des magnetischen Feldes im Innern und an den Enden einer Reihe von mehreren gleich gerichteten parallelen Kreisströmen, also auch eines Solenoids. Wir sehen, dass die resultirenden Kraftlinien annähernd parallel zur Axe verlaufen und an den Enden divergiren, ähnlich wie bei einem Magnet.

Fig. 702.

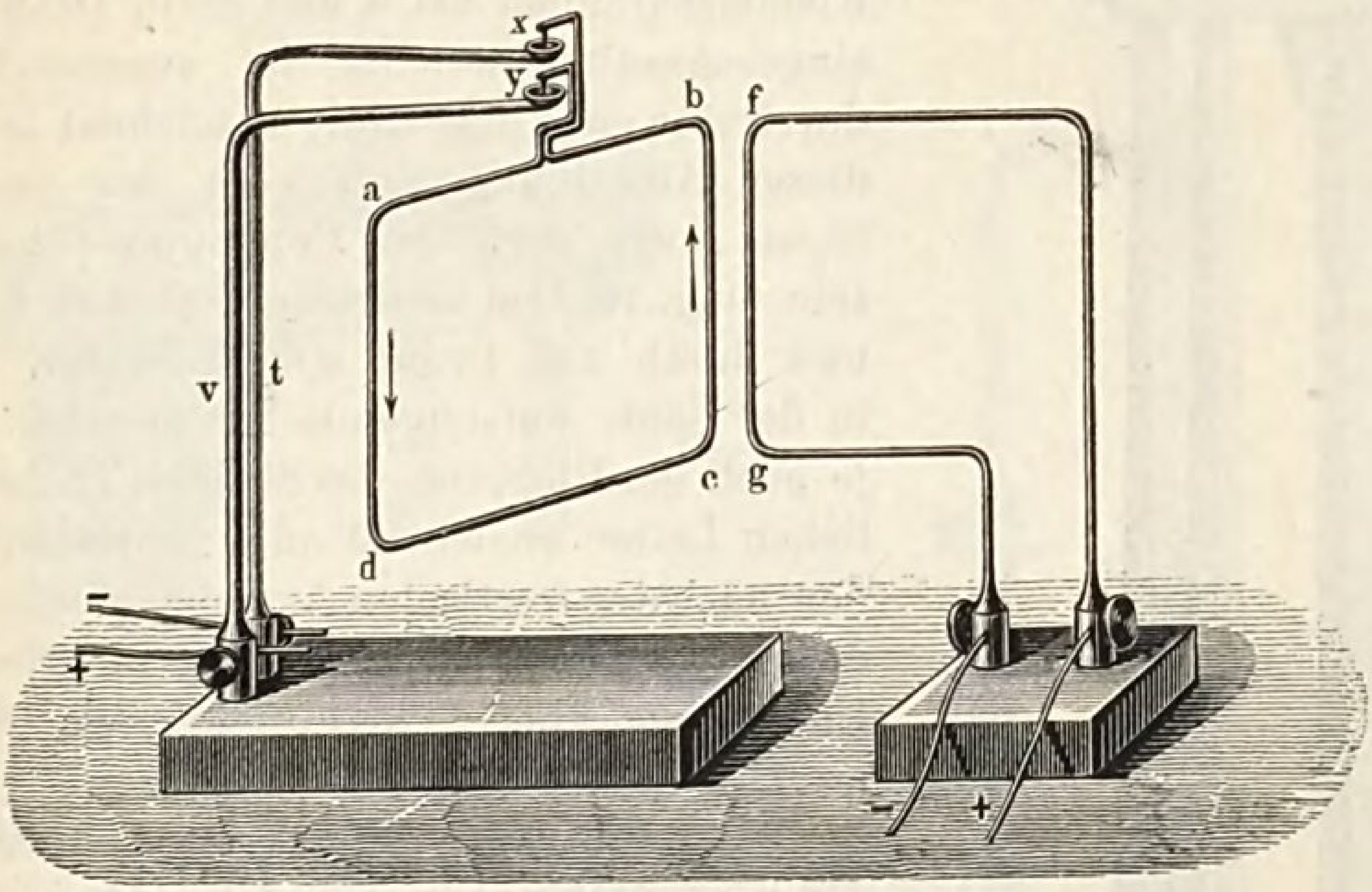


Die eben besprochene gegenseitige Einwirkung paralleler Ströme lässt sich mit Hülfe des Ampère'schen Gestelles in folgender Art nachweisen. Man hänge in die Quecksilbernäpfchen x und y, Fig. 703, einen rechtwinkligen Stromleiter $abcd$ und stelle, wenn sich derselbe unter dem Einflusse des Erdmagnetismus eingestellt hat, den rechtwinklig gebogenen Leitungsdraht, Fig. 704, so daneben, dass das verticale Drahtstück fg, Fig. 704, sich in der Nähe des verticalen Drahtstückes bc, Fig. 703, aber ausserhalb der Ebene des beweglichen Leiters befindet.

*) Dieselbe ist von W. Thomson gezeichnet und dem Lehrbuche der Elektricität und des Magnetismus von J. Cl. Maxwell (deutsch von Weinstein), Bd. II, Tafel XIX, entnommen. Eine Anleitung zum Zeichnen derselben findet sich in demselben Buche S. 422 gegeben.

Man beobachtet nun eine Anziehung oder eine Abstossung zwischen den benachbarten verticalen Stromarmen, je nachdem der Strom in ihnen gleich oder entgegengesetzt gerichtet ist. Man stellt den Versuch am besten in der Weise an, dass man den Strom einer Säule von etwa drei Bunsen'schen Bechern durch den beweglichen Stromleiter, den Strom von drei anderen durch den festen Draht, Fig. 704, hindurchgehen lässt. Sind die Ströme in *bc*, Fig. 703, und in *fg*, Fig. 704, gleich gerichtet, so dass Anziehung zwischen ihnen stattfindet, so braucht man nur in

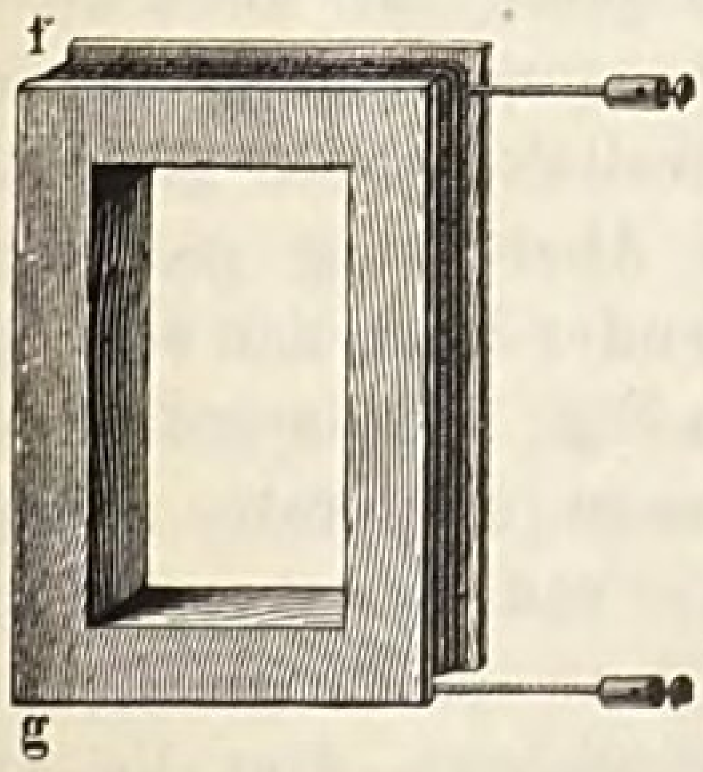
Fig. 703. Fig. 704.



dem beweglichen Stromleiter, Fig. 703, oder in dem festen, Fig. 704, mittelst eines Commutators den Strom umzukehren, um die Anziehung in Abstossung zu verwandeln.

Der Versuch gelingt noch besser, wenn man statt des beweglichen Leiters, Fig. 703, den beweglichen astatischen Leiter, Fig. 598, S. 715, anwendet.

Fig. 705.



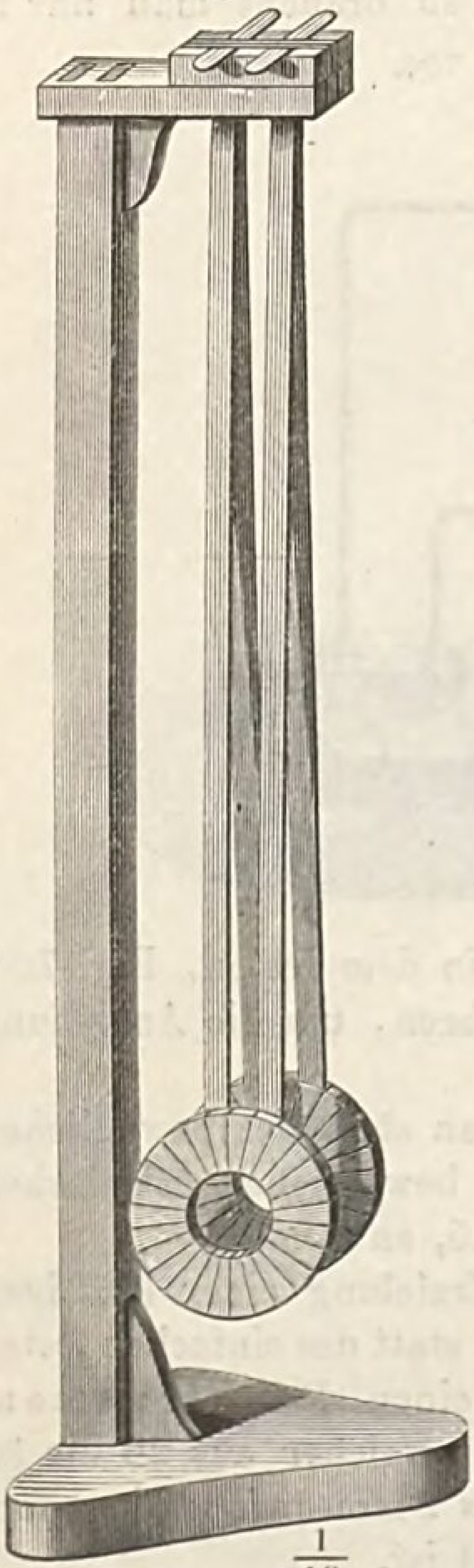
Auch ist es zur Erzielung einer kräftigen Wirkung zweckmässig, statt des einfachen festen Drahtes, Fig. 704, einen Drahtrahmen, Fig. 705, anzuwenden, welcher aus 20 bis 30 Windungen eines 1 bis 2 mm dicken übersponnenen Drahtes gebildet ist.

Um mit dem von Stöhrer construirten Ampère'schen Gestell die gegenseitige Einwirkung von Strömen auf einander zeigen zu können, ist an demselben eine Vorrichtung angebracht, welche in §. 197 noch nicht besprochen wurde. Rechts von der Holzsäule *S*, Fig. 599, S. 716, welche den beweglichen Stromleiter trägt, ist noch eine zweite (*R*) angebracht, in deren Axe sich ein Messingstäbchen bis zur Klemmschraube *a* erhebt. Dieses Stäbchen ist von einer Messinghülse umgeben, welche bis zur

Höhe b aufsteigt, welche aber durch mehrere isolirende Lagen von Papier vor leitender Berührung mit dem centralen Stäbchen geschützt ist.

Das centrale Stäbchen ist durch einen theils unter dem Brette herlaufenden Kupferdraht mit dem Messingbogen tu, Fig. 600, die Messinghülse ist mit dem Messingsäulchen v in leitender Verbindung. Es wird nun der negative Poldraht der Säule, welcher bei der in §. 197 betrachteten Anordnung bei t eingeschraubt war, dort weggenommen und in dem Messingsäulchen v eingeschraubt; ferner wird in die Klemmschrauben bei a und c ein Draht afc eingeschraubt, welcher in unserer Figur durch eine punktirte Linie bezeichnet ist. Bei dieser Anordnung nun geht der positive Strom, wie auch der Commutator gestellt sein mag, in dem centralen Stäbchen hinauf und durch den Draht afc herunter. Der in der Säule aufsteigende Strom wirkt nun je nach der Richtung des Stromes im beweglichen Leiter anziehend oder abstossend auf den nächsten verticalen Arm desselben, ohne dass diese Wirkung durch den in grösserer Entfernung über f herabsteigenden Strom merklich gestört würde.

Fig. 706.



$\frac{1}{10}$

Wenn aber ein kurzer Draht zwischen den Klemmschrauben a und b eingeschraubt ist, wie es Fig. 599 zeigt, so geht der Strom durch die Hülse von b nach c herunter, und nun wird die Wirkung des aufsteigenden Stromes durch den dicht neben ihm absteigenden aufgehoben, der bewegliche Leiter wird jetzt nur noch durch den Einfluss des Erdmagnetismus gerichtet.

Die Anziehung paralleler gleich gerichteter Ströme und die Abstossung paralleler entgegengesetzt laufender lässt sich sehr anschaulich mit dem in Fig. 706 dargestellten, von Buff angegebenen Apparate zeigen. Zwei Bandspiralen von der bereits auf Seite 626 beschriebenen Construction sind mittelst zweier, ungefähr 1 m langer Zuleitungsstreifen von Kupferblech so aufgehängt, dass die Axe der einen in die Verlängerung der Axe der anderen fällt und dass die einander zugekehrten Flächen der beiden Spiralen fast in Berührung sind. Werden nun beide von dem Strome einer aus 4 bis 6 Bunsen'schen Bechern gebildeten Säule durchströmt, so stossen sie sich kräftig ab, wenn die Strömungsrichtung nicht in beiden Spiralen dieselbe ist.

Die Zuleitungsstreifen, welche vorher parallel neben einander hingen, divergiren alsdann so, dass die Spiralen 5 bis 7 cm aus einander stehen, wie es die Figur andeutet.

Bringt man zwischen die Zuleitungsstreifen der beiden Spiralen, gegen das obere Ende hin, einen ungefähr 7 cm dicken Holzstab, so dass die Spiralen, so lange sie nicht durchströmt sind, in 7 cm Abstand von einander hängen, so werden sie, wenn man einen Strom in gleicher Richtung durch sie hindurch leitet, einander so stark anziehen, dass sie vollständig zusammenklappen.

Fig. 707.

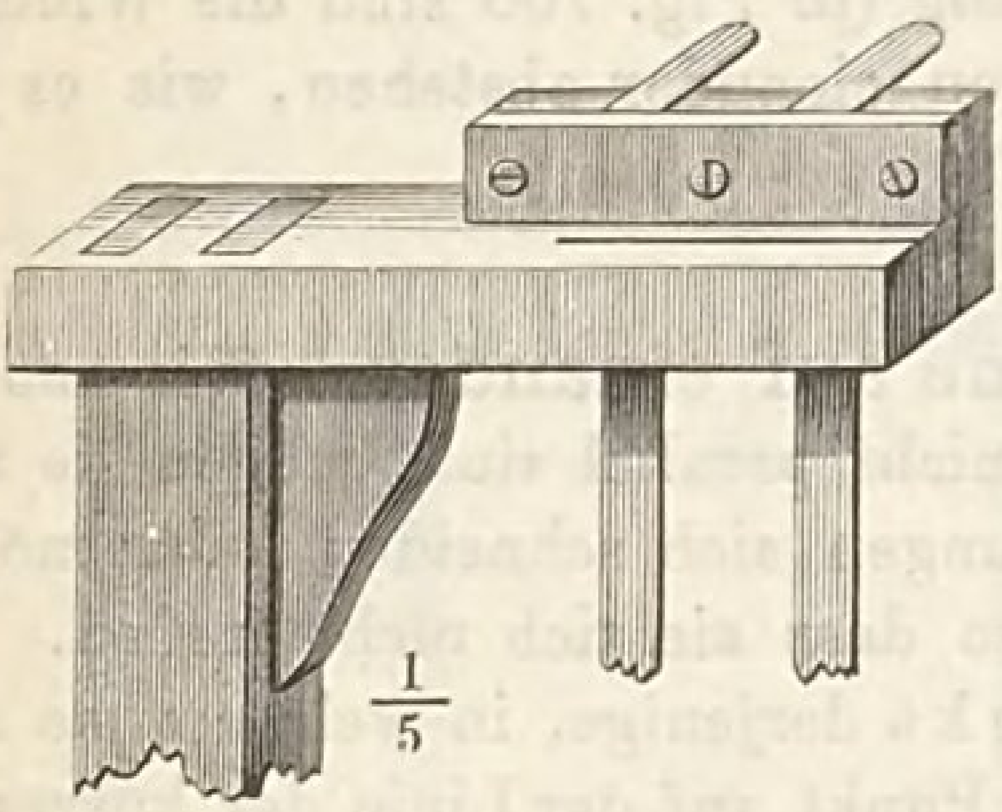
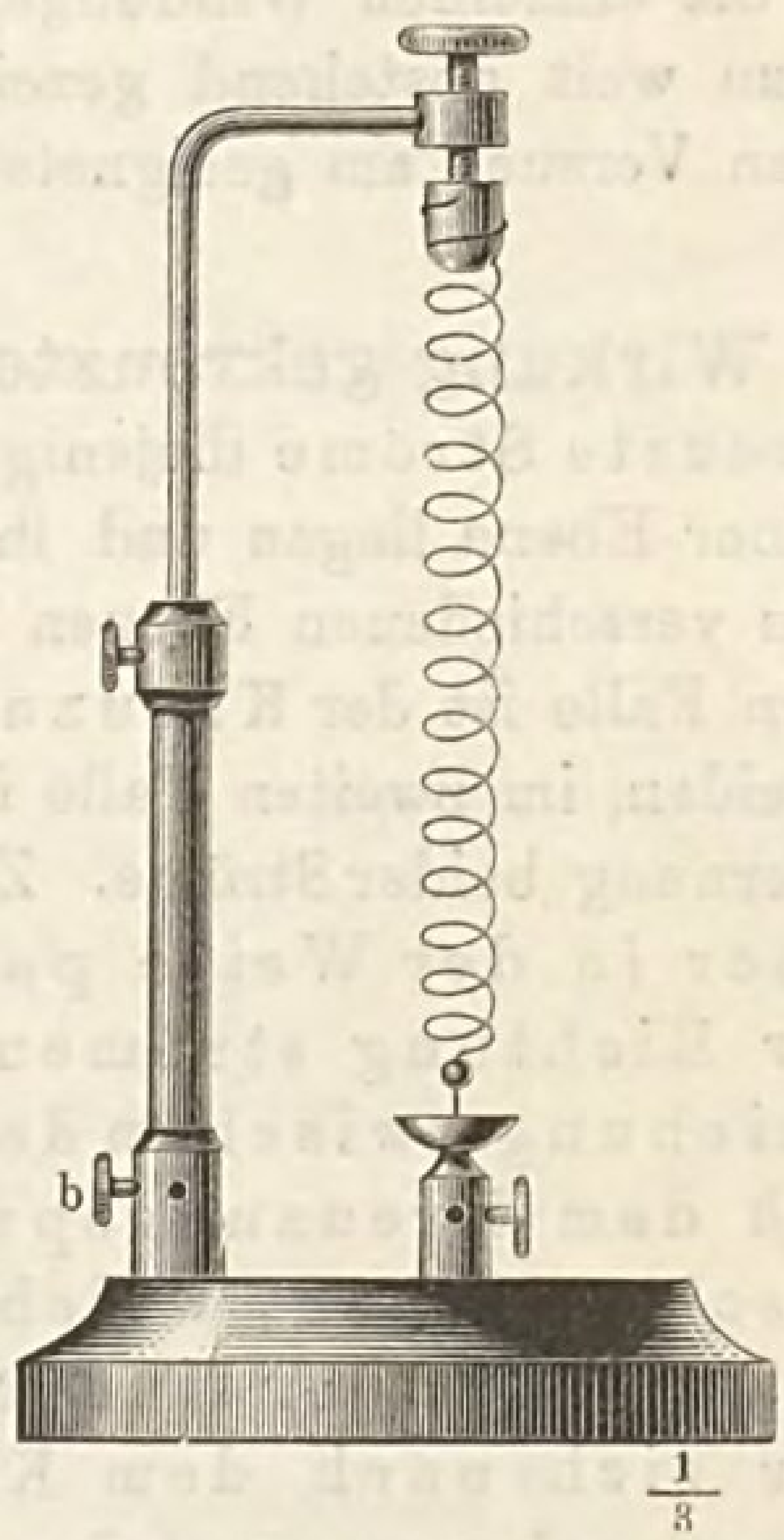


Fig. 708.



Die Art der Aufhängung kann man aus Fig. 707 ersehen, welche die Aufhängung der Zuleitungsstreifen für die hintere Spirale, Fig. 706, darstellt.

Da gleich gerichtete parallele Ströme einander anziehen, so müssen auch die einzelnen Windungen einer durchströmten Drahtspirale eine anziehende Wirkung auf einander ausüben. Es lässt sich dies sehr schön mit Hülfe der Roget'schen Spirale, Fig. 708, zeigen. Eine Spirale von Kupferdraht wird an einem passenden Stativ aufgehängt, welches erlaubt, dass man die ganze Spirale nach Belieben etwas heben oder senken kann. Das untere Ende der Spirale, welches so umgebogen ist, dass es ungefähr in der Richtung der Axe der Spirale sich befindet, hängt in ein Quecksilbernäpfchen so herab, dass die Drahtspitze eben das Quecksilber berührt. Setzt man nun das Quecksilbernäpfchen mit dem einen Pol einer Säule in Verbindung, welche etwa aus einem oder drei Bunsen'schen Bechern besteht, während von dem anderen Pol dieser Säule ein Draht zu der Klemmschraube geführt wird, welche das andere Ende der aufgehängten Drahtspirale bildet, so beginnt dieselbe sogleich eine Reihe von Oscillationen, indem sie sich abwechselnd zusammenzieht und dann wieder verlängert. In dem Moment nämlich, in welchem der Strom die Spirale zu durchlaufen beginnt, ziehen sich die einzelnen Win-

dungen an; dadurch wird die Spirale verkürzt, ihr unteres Ende aus dem Quecksilber gehoben und also der Strom unterbrochen. In Folge ihrer Schwere senken sich nun die Drahtwindungen wieder, bis das untere Ende der Spirale abermals in das Quecksilber eintaucht und nun dasselbe Spiel von Neuem beginnt.

Die Spirale wird dadurch hergestellt, dass man einen ungefähr 16 m langen, $^1/_2$ bis $^3/_4$ mm dicken Kupferdraht auf eine Glasröhre von 3 bis $3^1/_2$ cm äusserem Durchmesser so aufwindet, dass die Drahtgänge so dicht als möglich neben einander liegen. Wird der Draht nach einiger Zeit von der Glasröhre abgestreift, so dehnt sich die Spirale etwas aus, so dass die einzelnen Windungen ein wenig (in Fig. 708 sind die Windungen zu weit abstehend gezeichnet) von einander abstehen, wie es für obigen Versuch am geeignetsten ist.

216 **Wirkung gekreuzter Ströme auf einander.** Wir nennen gekreuzte Ströme diejenigen, die nicht parallel sind, mögen sie nun in einer Ebene liegen und ihre Richtungen sich schneiden, oder mögen sie in verschiedenen Ebenen liegen, so dass sie sich nicht treffen. Im ersten Falle ist der Kreuzungspunkt derjenige, in welchem sie sich schneiden, im zweiten Falle ist es ein Punkt auf der Linie der kürzesten Entfernung beider Ströme. Zwei gekreuzte Ströme streben sich immer in der Weise parallel zu stellen, dass sie in gleicher Richtung strömen, oder mit anderen Worten: es findet Anziehung zwischen den Theilen des Stromes statt, welche nach dem Kreuzungspunkte hingehen, und dann wieder zwischen denen, welche vom Kreuzungspunkte abgehen. Abstossung aber findet statt zwischen einem Strome, welcher sich nach dem Kreuzungspunkte hin bewegt, und einem anderen, welcher von ihm weggeht.

Sind z. B. *ab* und *cd*, Fig. 709, zwei Ströme, deren Kreuzungspunkt *r* ist, so findet eine Anziehung zwischen den Theilen *ar* und *cr* statt, in welchen der Strom nach dem Kreuzungspunkte hingeht, und zwischen den Theilen *rb* und *rd*, in welchen er vom Kreuzungspunkte abgeht. Abstossung findet zwischen *ar* und *rd*, ferner zwischen *cr* und *rb* statt.

Es lässt sich dies experimentell darthun, wenn man an das Ampère'sche Gestell, Fig. 703, S. 823, eine astatische Stromvorrichtung anhängt, bei welcher, wie man in Fig. 711 sieht, die beiden entgegengesetzt wirkenden geschlossenen Stromtheile nicht neben einander liegen, wie in Fig. 598, sondern unter einander. Hält man nun unter das horizontale Drahtstück *ab* des astatischen beweglichen Leiters einen horizontalen Leitungsdraht *qnop*, so dass *on* einen beliebigen Winkel mit *ab* macht, so wird sich der bewegliche Leiter in einer dem eben ausgesprochenen Satze entsprechenden Richtung drehen.

Es versteht sich von selbst, dass man auch hier den Drahtrahmen Fig. 705, statt des einfachen Leiters *opqn* anwenden kann.

Um diesen Versuch mit dem Stöhrer'schen Apparate anzustellen, wird der bewegliche Leiter, Fig. 599, S. 716, mit dem astatischen Leiter, Fig. 710, vertauscht, und die Klemmschrauben *a* und *b* durch einen Leitungsdraht *afgb* verbunden, der von *a* aus in horizontaler Rich-

Fig. 710.

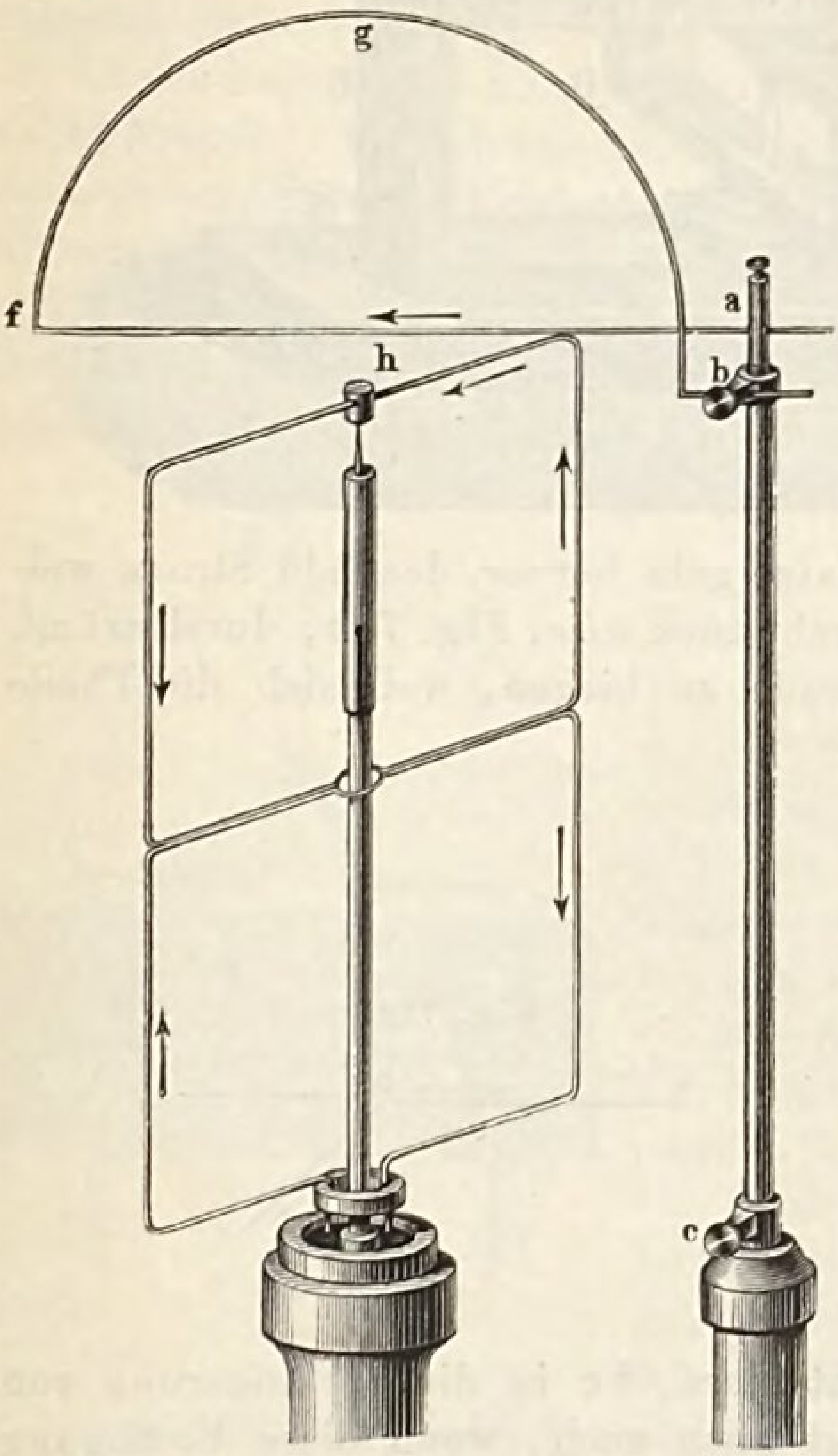


Fig. 709.

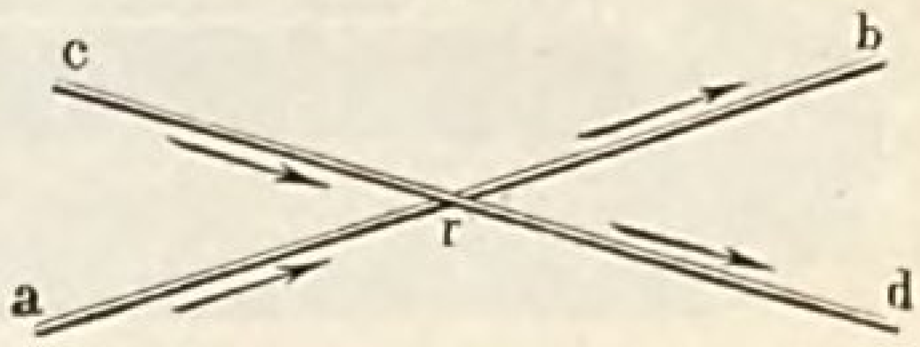
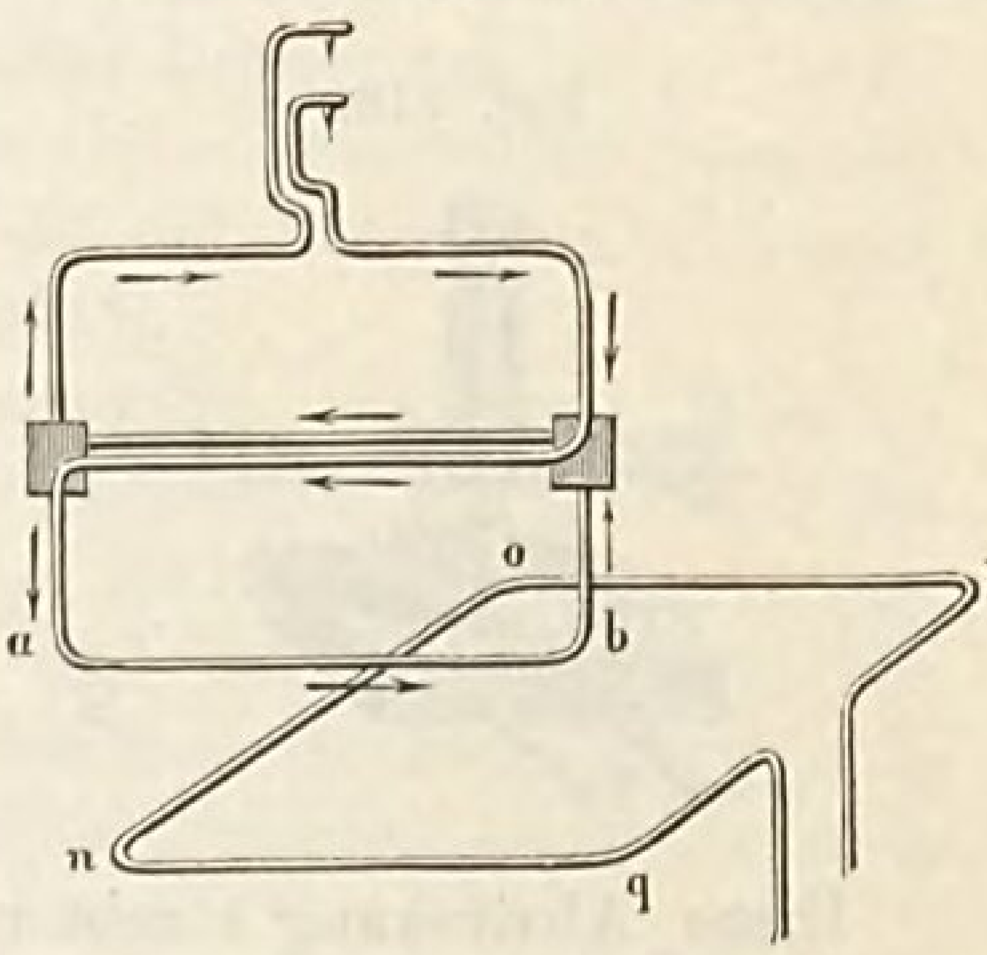


Fig. 711.

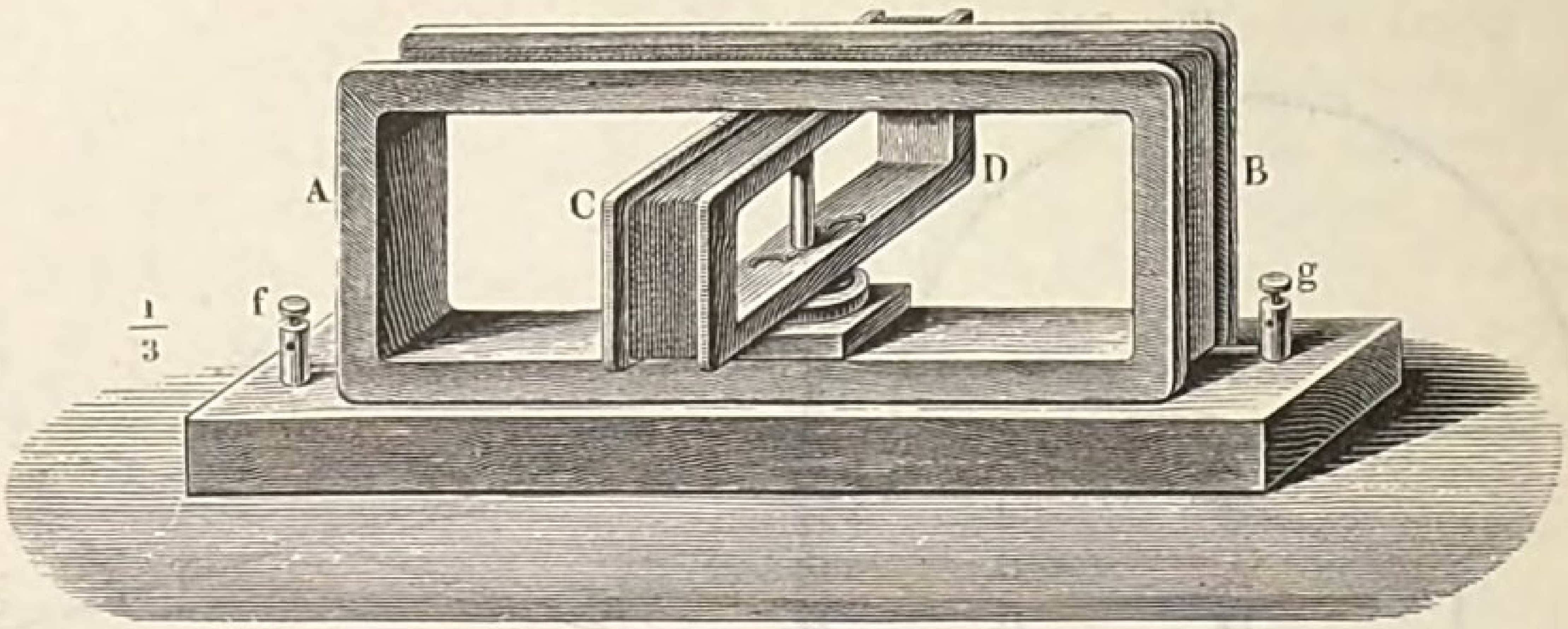


tung über *h* hinweg nach *f* und dann oben im Bogen über *g* nach *b* läuft.

Die Wirkung, welche gekreuzte Ströme auf einander ausüben, lässt sich auch mit einem von Garthe angegebenen, in etwas veränderter Form in Fig. 712 (a. f. S.) dargestellten Apparate zeigen. Innerhalb eines festen hölzernen Rahmens *AB*, auf welchen mehrere Lagen eines etwas dickeren (1 bis 5 mm) übersponnenen Kupferdrahtes aufgewunden sind, ist ein beweglicher Drahtrahmen *CD* angebracht, welcher auf einer Stahlspitze spielt, etwa so, wie es Fig. 713 darstellt. Dieses bewegliche Rähmchen muss möglichst leicht sein. Es ist nur mit einer Lage von Drahtwindungen eines übersponnenen dünneren (gegen $^1/_2$ mm dicken) Kupferdrahtes umwickelt, dessen freie Enden in zwei von einander iso-

lirte Quecksilbernäpfchen eintauchen, wie Fig. 713 erläutert. Den Drahtwindungen des Rahmens AB wird der Strom einer entsprechenden Batterie (für jeden Rahmen etwa zwei Bunsen'sche Becher) durch die Schraubklemmen f und g, den beiden Quecksilbernäpfchen wird er durch die Drähte h und k zugeführt.

Fig. 712



Aus dem in Rede stehenden Satze geht hervor, dass ein Strom, welcher ein im Winkel gebogenes Drahtstück abc, Fig. 714, durchströmt, ein Bestreben hat, den Draht gerade zu biegen, weil sich die Theile ab und bc des Stromes abstossen.

Fig. 713.

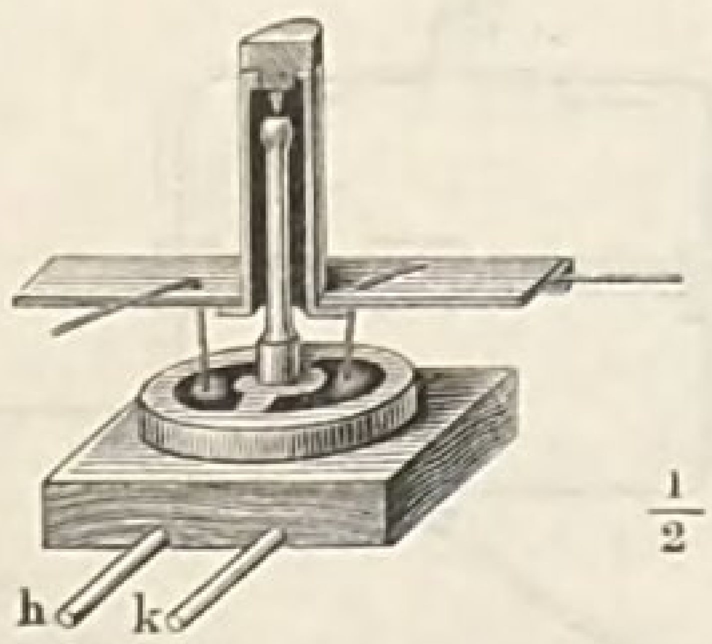
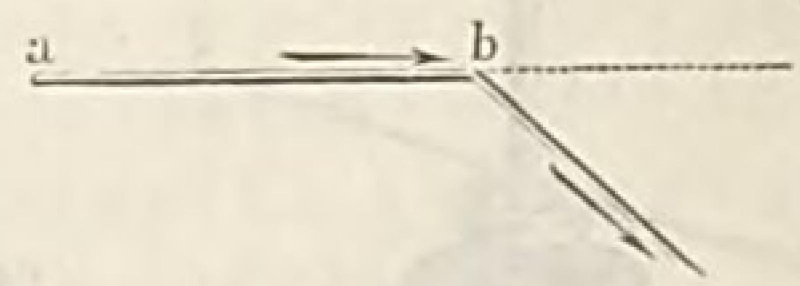
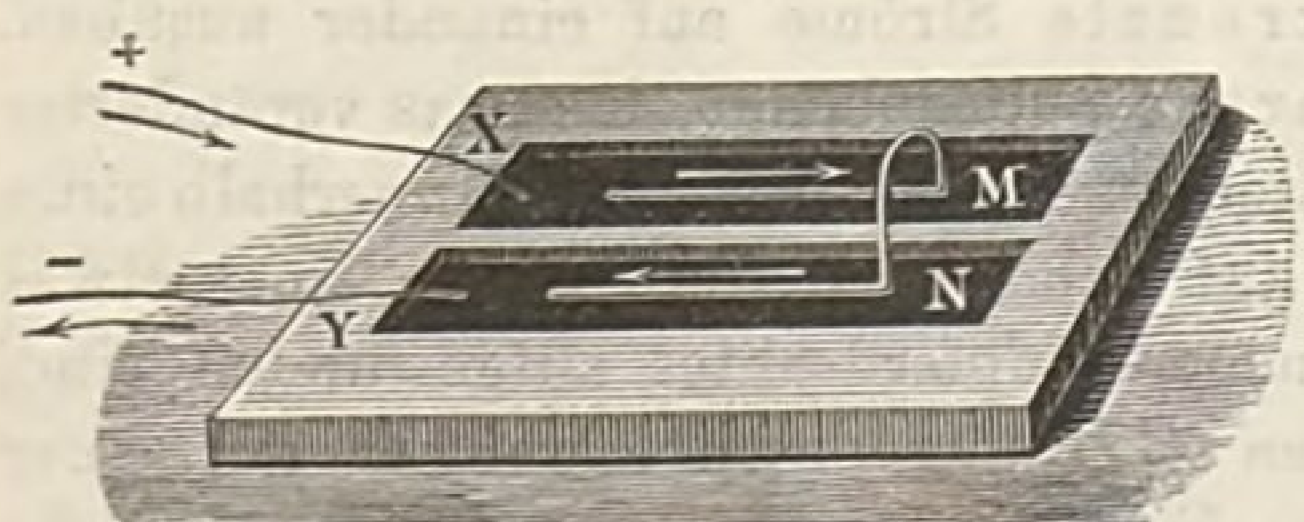


Fig. 714.



Diese Abstossung strebt nicht bloss, bc in die Verlängerung von ab zu bringen, sondern sie wirkt auch noch, wenn diese Bedingung erfüllt ist, d. h. die verschiedenen zusammenhängenden Theile eines und desselben geradlinigen Stromes stossen sich ab. Zur experimentellen Prüfung dieser Folgerung construirte de la Rive einen Apparat, welcher im Wesentlichen durch Fig. 715 dargestellt wird. Ein mit Quecksilber gefülltes Gefäss ist durch eine nicht leitende Scheidewand in zwei Abtheilungen getheilt. Ein dünner Kupferdraht ist so gebogen, dass er von einer Ab-

Fig. 715.



theilung in die andere führt, und dass sich in jeder Gefässabtheilung noch ein horizontaler Arm befindet, welcher der Scheidewand parallel ist; diese horizontalen Arme sind bis auf das Ende, welches, etwas abwärts gebogen in das Quecksilber eintaucht, mit Siegellack überzogen. Bringt man nun die beiden Poldrähte einer galvanischen Kette in die Verlängerung der horizontalen Arme dieses Drahtes in das Quecksilber, so muss der ganze Draht von diesen Poldrähten zurückweichen.

Das Experiment misslingt aber leicht, wenn das Quecksilber im Geringsten verunreinigt oder oxydirt ist.

Faraday suchte die fragliche Abstossung durch folgenden Versuch nachzuweisen: Von einem kupfernen Bügel *ab*, Fig. 716, hingen zwei dünnere amalgamirte Kupferdrähte in die von einander isolirten Quecksilbergefässe *c* und *d* herab, welche mittelst der dicken Kupferdrähte *f* und *g* mit den Polen der Säule in Verbindung gebracht werden konnten. Der Bügel *ab* war an dem einen Arme einer empfindlichen Wage aufgehängt, die genau äquilibrirt worden war. Beim Schliessen der Kette

Fig. 716.

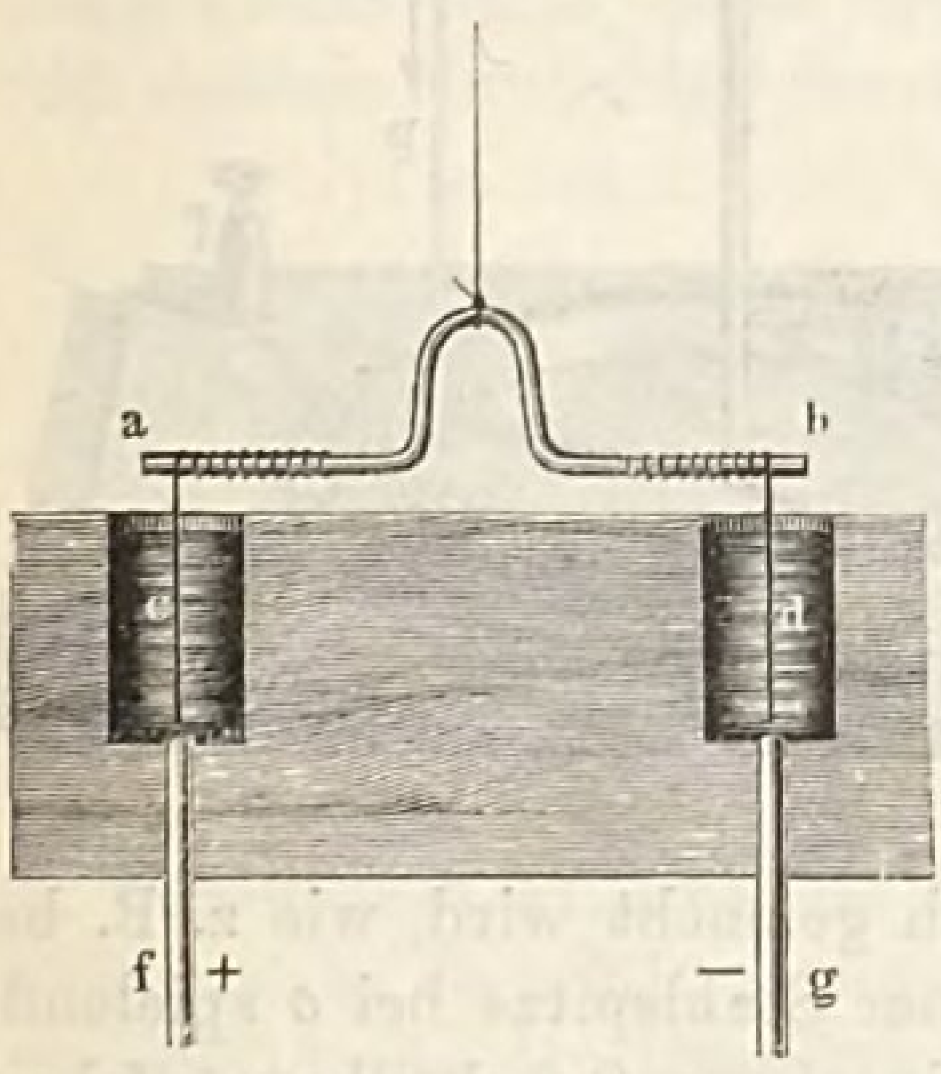


Fig. 717.



stiegen die in die Quecksilbernäpfchen herabhängenden Drähte um einige Centimeter in die Höhe, um wieder herabzusinken, sobald der Strom wieder unterbrochen wurde*).

Mit Anwendung von zwei Rhumkorff'schen Elementen, deren Strom die dünnen Drähte ins Glühen brachte, konnte ein Heben und Senken von ungefähr 15 mm beobachtet werden, als die in das Quecksilber herabhängenden Drähte 0,2 mm dick waren.

Gegen diese Form des Versuches lässt sich übrigens die Einwendung machen, dass die Abstossung von den seitlich aus dem Quecksilber in den Draht eintretenden Stromtheilen herrühre.

Wenn nun aber auch der experimentelle Beweis dieses letzteren Satzes noch zweifelhaft sein sollte, so ist doch die Wahrheit, dass zwei gleich gerichtete Stromtheilchen *A* und *B*, Fig. 717, welche mit der Richtung ihrer Verbindungslinie zusammenfallen, eine abstossende Wirkung auf einander ausüben, nicht in Zweifel zu ziehen, indem sie sich als nothwendige Folge der übrigen Gesetze ergiebt, nach welchen zwei Ströme auf einander wirken.

*) Gilbert's Ann. LXXII.

217 **Rotation eines Stromes unter dem Einflusse eines anderen.** Denken wir uns einen festen unbegrenzten Strom *ab* und einen Strom *cd*, Fig. 718, welcher von dem Stromleiter *ab* weggerichtet und parallel mit sich selbst verschiebbar ist, so wird, wenn der Kreuzungspunkt in *r* ist, zwischen den Theilen *cd* und *rb* Anziehung, zwischen *ar* und *cd* aber Abstossung stattfinden. Jede dieser beiden Kräfte lässt sich in zwei andere zerlegen, von denen die eine parallel mit *ab*, die andere rechtwinklig auf *ab* ist. Da *cd* nun in der Richtung von *ab* verschiebbar ist, so können die mit *cd* parallelen Composanten keine Wirkung hervorbringen; die mit *ab* parallelen aber vereinigen sich zu einer Resultirenden, welche den Strom *cd* in der Richtung von *a* nach *b* forttreibt.

Wenn der feste Strom *ab* kreisförmig gebogen ist, so muss sich der Strom *cd* in Folge derselben Wirkung beständig im Kreise herumdrehen,

Fig. 718.

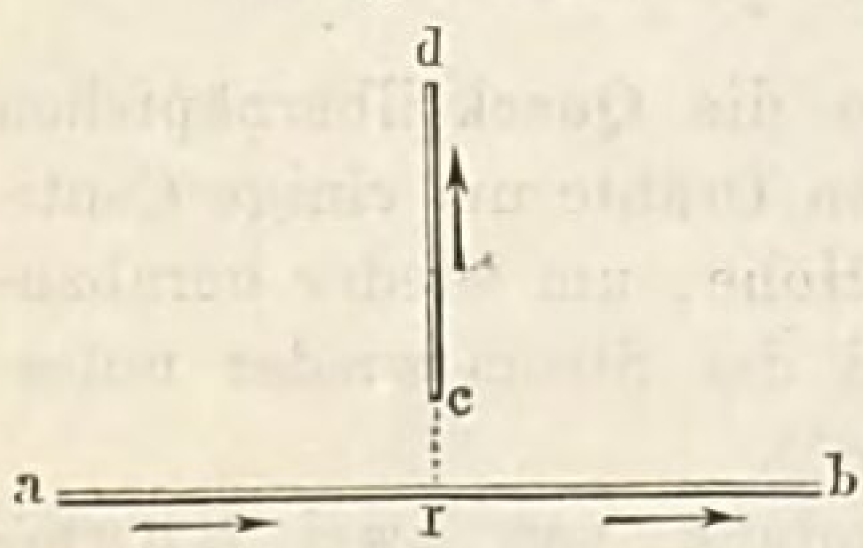
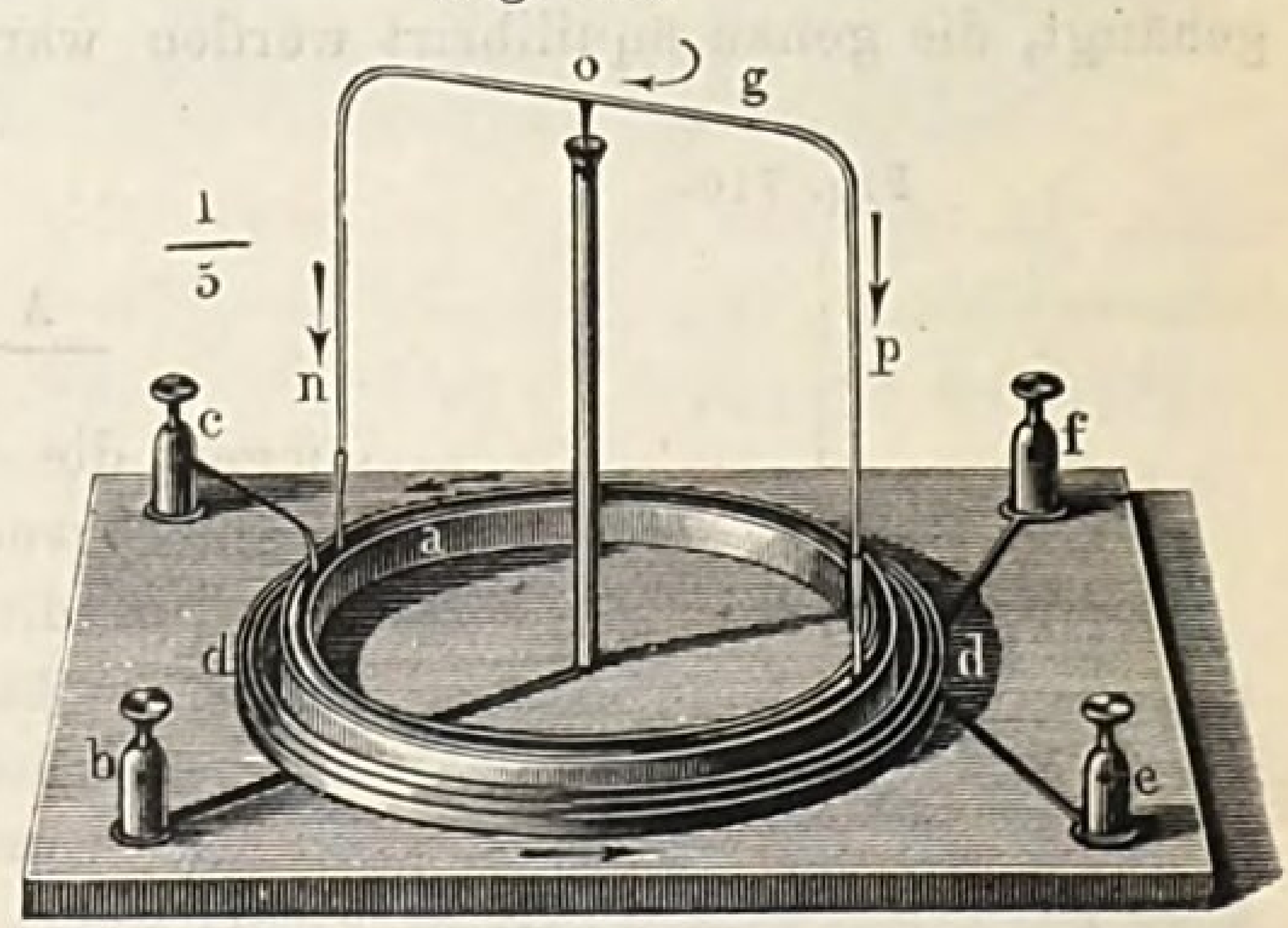


Fig. 719.



wenn er in der geeigneten Weise beweglich gemacht wird, wie z. B. bei dem Apparate Fig. 719, wo *nop* der auf einer Stahlspitze bei *o* spielende Leitungsdraht ist. Die Stahlspitze sitzt in einem Quecksilbernäpfchen, welches den Gipfel eines mit der Klemmschraube *b* leitend verbundenen Metallsäulchens bildet. Der in dem Metallsäulchen aufsteigende Strom geht in den verticalen Armen *p* und *n* des um *o* drehbaren Leiters herab, deren Enden in die kreisförmige Quecksilberrinne *a* eintauchen. Das Quecksilber dieser Rinne ist mit der Klemmschraube *c* leitend verbunden. Die Quecksilberrinne wird endlich mit einer flachen Magnetisirungsspirale *dd* umgeben, welche entweder durch mehrere über einander gewickelte Lagen von dickem Kupferdraht oder in der durch Fig. 526, S. 626 erläuterten Weise durch einen Kupferblechstreifen gebildet ist. Die Enden dieser Spirale sind mit den Klemmschrauben *e* und *f* leitend verbunden.

Um den Apparat in Gang zu setzen, kann man die beiden Poldrähte einer Säule bei *b* und *c*, die beiden Poldrähte einer zweiten Säule aber in *e* und *f* einschrauben, oder man kann die beiden Pole der Säule bei

b und *e* einschrauben und dann die Klemmschrauben *c* und *f* durch einen Kupferdraht verbinden.

So wie man früher die elektrischen Anziehungen und Abstossungen zu einer Menge von elektrischen Spielereien benutzte, so hat man jetzt auch die elektromagnetischen Rotationsphänomene auf die mannigfaltigste Weise variirt. Es mag hier genügen, die Grundphänomene in den einfachsten Formen kennen gelernt zu haben.

Elektrodynamisches Gesetz. Wir haben die gegenseitige 218
Wirkung zweier Ströme nur in einigen speciellen Fällen kennen gelernt. Ampère hat aber ein Gesetz aufgestellt, nach welchem sich für alle gegenseitigen Lagen die gegenseitige Einwirkung zweier Stromtheilchen berechnen lässt. Dieses Gesetz, nach welchem die Theilchen *ab* und *cd*, Fig. 720, zweier Stromleiter auf einander wirken, ist nach Ampère durch die Gleichung

$$R = \frac{i\,i'}{r^2}\left(\cos\varepsilon - \tfrac{3}{2}\cos\theta\cos\theta'\right) s\,s'$$

ausgedrückt, d. h. diese Gleichung drückt die Grösse der Kraft R aus, mit welcher die beiden Stromelemente (die jedoch nicht in einer Ebene

Fig. 720.

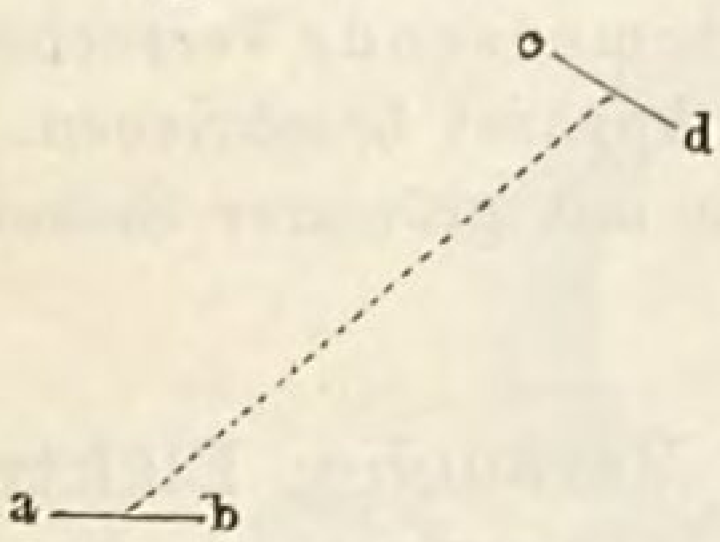
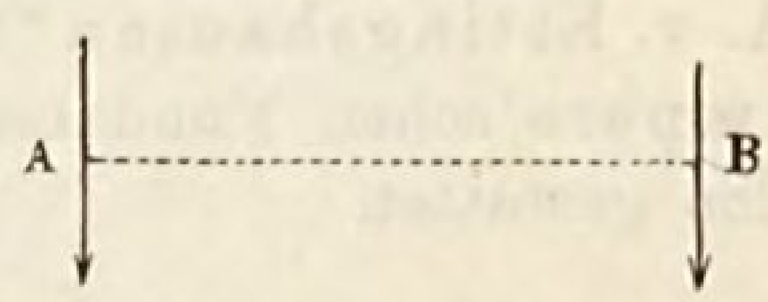


Fig. 721.



zu liegen brauchen) auf einander in der Richtung derjenigen Linie wirken, welche ihre Mittelpunkte verbindet, vorausgesetzt, dass r die Entfernung dieser Mittelpunkte, i die Stromstärke in dem einen, i' die im anderen Stromelemente, s aber die Länge des einen, s' die des anderen Stromelementes bezeichnet. Es ist ferner ε der Winkel, welchen *cd* mit *ab* macht; θ ist der Winkel, welchen das eine, θ' der Winkel, welchen das andere Stromelement mit ihrer Verbindungslinie macht. Für zwei parallele Stromtheilchen A und B, Fig. 721, welche bei gleicher Richtung rechtwinklig auf ihrer Verbindungslinie stehen, ist $\varepsilon = 0$, θ und $\theta' = 90^0$, es wird also: $R = \frac{i\,i'}{r^2} \cdot s s'$.

Die Gleichung zeigt also in diesem Falle eine Anziehung an, wie sie auch der Versuch nachgewiesen hat. Da $\cos 180^0 = -1$, so wird der Werth von R negativ, wenn die beiden parallelen Ströme entgegengesetzte Richtung haben, also wenn $\varepsilon = 180^0$ ist. Für den in Fig. 717 dargestellten Fall ist $\varepsilon = 0$, $\theta = \theta' = 0$, der Werth von R reducirt sich also auf

$$R = -\frac{1}{2}\frac{ii'}{r^2} ss'.$$

Die Ampère'sche Gleichung zeigt also für diesen Fall eine Abstossung an; kurz, wir sehen, dass das Ampère'sche Gesetz wirklich alle speciellen Fälle der gegenseitigen Einwirkung zweier Stromtheilchen umfasst, die wir oben kennen gelernt haben.

Die experimentelle Bestätigung der Ampère'schen Theorie ist allerdings etwas mangelhaft; vorzugsweise ist ins Auge zu fassen, dass sich jenes Gesetz auf die Wirkung zweier Stromelemente bezieht, wir aber unsere Versuche nur mit geschlossenen Strömen anstellen können, so dass wir die Wirkung zweier Stromtheile auf einander nie ganz rein, wenn auch in günstigen Fällen entschieden überwiegend, darzustellen im Stande sind. Ampère selbst hat seine Theorie aus verhältnissmässig mangelhaften Versuchen abgeleitet; alle seine Versuche sind qualitativer, nicht quantitativer Natur. Für eigentliche Messungen waren seine Apparate freilich nicht brauchbar.

Weber hat nun diese Lücke ausgefüllt. Zunächst hat er nicht die Wirkung einzelner Stromelemente auf einander untersucht, sondern er hat berechnet, welches nach der Ampère'schen Theorie die Gesammtwirkung zweier durchströmten Drahtrollen auf einander sein müsse, und hat dann dieses Resultat der Theorie durch messende Versuche geprüft.

A. v. Ettingshausen*) hat einen Apparat beschrieben, welcher die Ampère'schen Fundamentalversuche mit grösserer Sicherheit anzustellen gestattet.

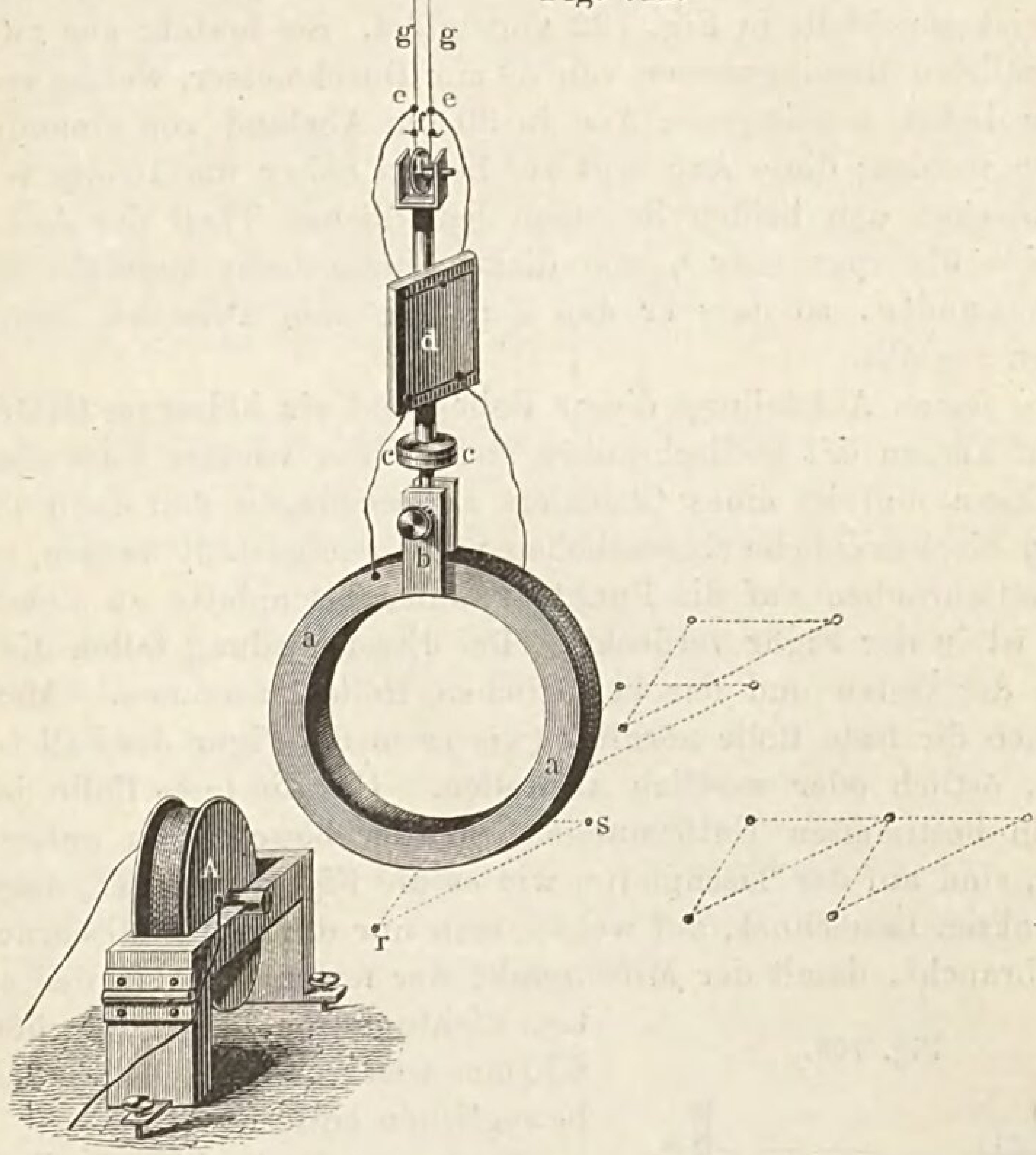
219 **Weber's elektrodynamische Versuche; Elektrodynamometer.** Bei der Ampère'schen Aufhängung ist die Reibung, welche der bewegliche Stromleiter bei seiner Drehung zu überwinden hat, sehr bedeutend, ein Umstand, welcher die messende Bestimmung der hier wirkenden Kräfte unmöglich macht. Weber hat diese Schwierigkeit dadurch umgangen, dass er eine Drahtrolle bifilar aufhing und die beiden Aufhängungsdrähte als Zuleitung für den galvanischen Strom benutzte.

Eine der einfacheren Formen einer solchen Bifilarrolle sieht man in Fig. 722 abgebildet. Die Bifilarrolle *a* besteht aus einem dünnen Messingringe von 100 mm Durchmesser und 30 mm Breite, welcher zwei parallele Messingscheiben von 123 mm äusserem und 100 mm innerem Durchmesser verbindet, und in 30 mm Abstand von einander hält. Auf jenem Messingringe zwischen den beiden Scheiben ist ein Kupferdraht von $^1/_3$ mm Durchmesser, der mit Seide übersponnen ist, ungefähr 3000 mal herumgewunden, so dass er den Zwischenraum zwischen beiden Scheiben ganz ausfüllt. Nach Aufwindung des Drahtes wurden die beiden Messingscheiben durch eine messingene Klemme *b* verbunden, welche in ihrer

*) Wien. Akad. Ber. LXXVII, 1878.

Mitte den Torsionskreis *c* trägt. Die obere Scheibe des Torsionskreises trägt einen hölzernen Zapfen, an dessen oberem Ende eine Gabel mit einer sehr beweglichen Rolle von 20 mm Durchmesser befestigt ist. Unter dieser Rolle ist ein seidener Faden weggeführt, welcher zu beiden Seiten der Rolle senkrecht nach oben geht und an den beiden Suspensionsdrähten *gg* angeknüpft ist. Mit den beiden Enden der Suspensionsdrähte sind nun noch die beiden Drahtenden der Rolle in Verbindung gebracht, so dass der galvanische Strom, in einem Aufhängedraht her-

Fig. 722.



untersteigend, in die Drahtrolle übergeht und, nachdem er ihre Windungen durchlaufen hat, im anderen Suspensionsdrahte aufsteigend zurückkehrt. Die beiden Suspensionsdrähte sind an zwei an der Decke befindlichen isolirten Haken befestigt, durch welche die Zuleitung des Stromes stattfindet. Die Aufhängedrähte sind von Kupfer und bei 1 m Länge $^1/_6$ mm dick.

Bei den Weber'schen Versuchen wurde die Axe der Bifilarrolle in den magnetischen Meridian gebracht, so also, dass ihre Ebene rechtwinklig auf demselben stand. An dem Holzzapfen ist ein Spiegel *d* befestigt, so dass man die Ablenkung der Rolle aus ihrer Gleichgewichtslage mit einem Fernrohre auf die bekannte Weise ablesen kann.

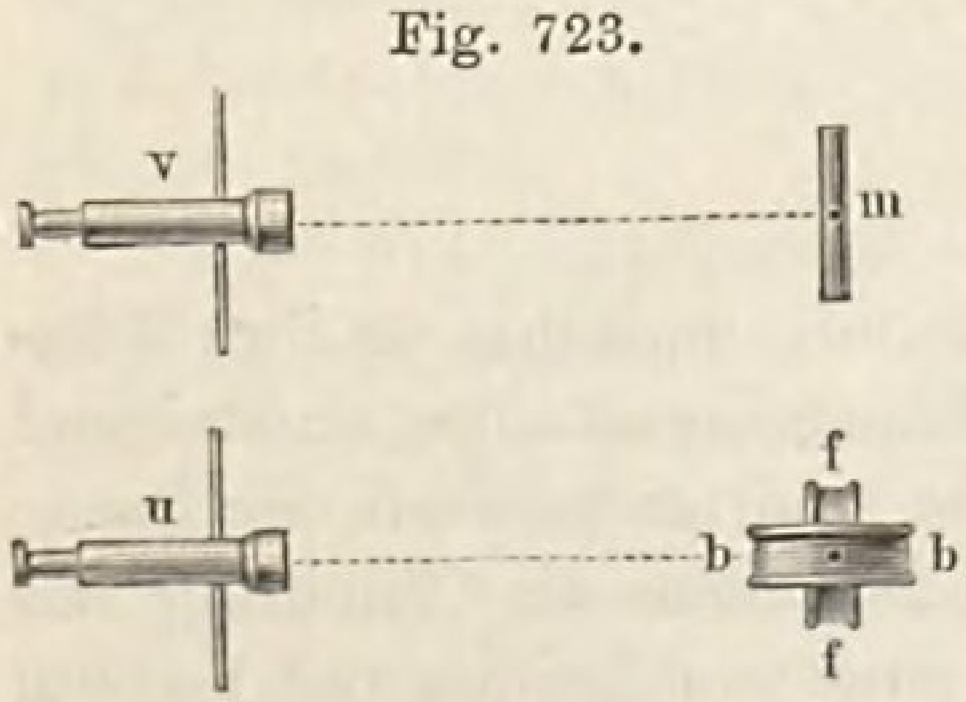
Der Benennung eines aufgehängten Magnetstabes (Magnetometer) entsprechend, nennt Weber eine durch ihre Aufhängung leicht bewegliche, den Strom leitende Drahtrolle ein Dynamometer, und zwar ist das eben beschriebene ein Bifilar-Dynamometer.

Wenn ein elektrischer Strom das Bifilar-Dynamometer durchläuft, so wird es aus seiner oben bezeichneten Gleichgewichtslage abgelenkt werden, sobald man ihm einen Magnetstab oder auch eine zweite durchströmte Drahtrolle nähert.

Die feste Drahtrolle, durch welche Weber auf die Bifilarrolle einwirkte, ist gleichfalls in Fig. 722 abgebildet. Sie besteht aus zwei dünnen parallelen Messingplatten von 89 mm Durchmesser, welche von einer $5^1/_2$ mm dicken messingenen Axe in 30 mm Abstand von einander festgehalten werden; diese Axe ragt auf beiden Seiten um 10 mm vor. Auf dem zwischen den beiden Scheiben befindlichen Theil der Axe ist ein mit Seide übersponnener $^1/_3$ mm dicker Kupferdraht ungefähr 1000 mal herumgewunden, so dass er den Zwischenraum zwischen den beiden Scheiben ausfüllt.

Zur festen Aufstellung dieser Rolle dient ein hölzernes Gestell, welches auf Füssen mit Stellschrauben steht. Der vordere Fuss dieses Gestelles kann mittelst eines Charniers aufgeschlagen und dann die feste Rolle in die bewegliche eingeschoben und so aufgestellt werden, dass die drei Stellschrauben auf die Punkte *rst* der Tischplatte zu stehen kommen (*t* ist in der Figur verdeckt). Bei dieser Stellung fallen die Mittelpunkte der festen und der beweglichen Rolle zusammen. Man kann aber auch die feste Rolle nördlich (wie es in der Figur der Fall ist) oder südlich, östlich oder westlich aufstellen. Um die feste Rolle jederzeit leicht in bestimmten Entfernungen von der beweglichen aufstellen zu können, sind auf der Tischplatte, wie es die Figur andeutet, eine Reihe von Punkten bezeichnet, auf welche man nur die drei Stellschrauben zu setzen braucht, damit der Mittelpunkt der festen Rolle in den erwähnten Richtungen 300, 400, 500 oder 600 mm weit von dem Mittelpunkte der beweglichen entfernt ist.

Fig. 723.



Eine erste Beobachtungsreihe wurde bei derjenigen Stellung der festen Rolle gemacht, für welche die Mittelpunkte beider Rollen zusammenfallen. Ein und derselbe Strom wurde durch die Bifilarrolle und dann durch die feste Rolle hindurchgeleitet und die Stärke des Stromes durch die Ablenkung gemessen, welche die feste Rolle an einem nördlich oder südlich angebrachten Magnetometer bewirkt. Die Anordnung des Versuches ist aus Fig. 723 ersichtlich. *bb* ist die Bifilarrolle, *ff* die feste Rolle und *m* das Magnetometer, während bei *u* und *v* Fernrohre mit Scalen zur Beobachtung der Drehung von *b* und *m* aufgestellt sind.

Wenn der Strom von einem bis drei Grove'schen Bechern gleichzeitig durch beide Rollen geht, so wird die Ablenkung der Bifilarrolle so gross, dass sie weit über die Grenzen der Beobachtungsscala hinausgeht, während der Strom der festen Rolle an dem Magnetometer eine für die Messung ganz geeignete Ablenkung hervorbringt. Um diesem Uebelstande abzuhelfen, brachte Weber an den Zuleitungsdrähten für die Bifilarrolle eine Nebenschliessung an, durch welche die Stromstärke in der Bifilarrolle im Verhältniss von 246,26 zu 1 vermindert wurde, während der Strom in der festen Rolle unverändert blieb. Freilich ist jetzt die Stromstärke in beiden Rollen nicht mehr dieselbe, die Stromstärke der einen steht aber in einem constanten Verhältniss zu der in der anderen.

Diese Versuche ergaben das Resultat, dass die elektrodynamische Kraft, mit welcher zwei Leitungsdrähte auf einander wirken, dem Producte ihrer Stromintensitäten, also bei gleicher Intensität, dem Quadrate derselben proportional ist, wie es in dem Grundprincip der Elektrodynamik vorausgesetzt ist.

Hierauf folgte nun eine grössere Versuchsreihe, um zu erforschen, auf welche Weise die elektrodynamische Kraft, mit welcher die beiden Rollen aufeinander wirken, von ihrer gegenseitigen Lage und Entfernung abhängt.

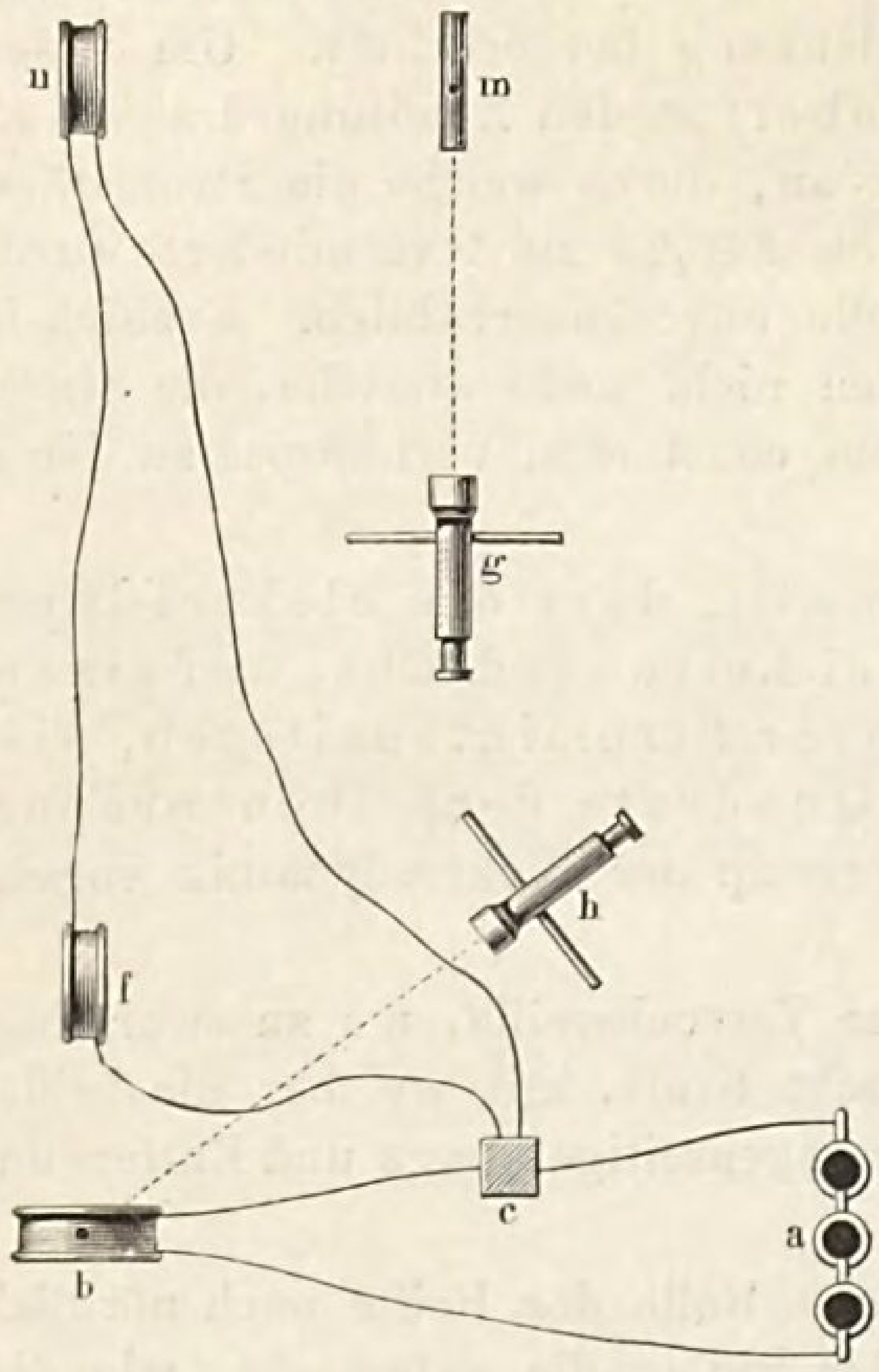
Zu diesem Zwecke wurde die feste Rolle der Reihe nach nördlich, östlich, südlich und westlich von der Bifilarrolle aufgestellt, wie dies schon oben aus einander gesetzt worden ist. Diese gegenseitigen Lagen und Entfernungen der beiden Drahtrollen entsprechen, wie man leicht sieht, genau den gegenseitigen Lagen und Entfernungen zweier Magnete, welche wir in §. 37 betrachtet haben. Der bifilar aufgehängte Ring vertritt hierbei die Stelle eines Magnetometers oder der Magnetnadel, die feste Rolle die Stelle des Ablenkungsstabes.

Gleichzeitig mit den Ablenkungen des Dynamometers muss aber auch die Stromstärke gemessen werden. Auf die bei der vorigen Versuchsreihe angewandte Weise kann dies hier nicht geschehen, weil die Stellung der festen Rolle verändert wird; es wurde deshalb der Strom auch noch durch eine dritte unveränderlich fest stehende Drahtrolle geführt und die Ablenkung gemessen, welche diese an einem Magnetometer bewirkt. Die ganze Anordnung ist aus Fig. 724 (a. f. S.) zu ersehen.

b ist die Bifilarrolle, *f* die verstellbare Rolle, *m* ein Magnetometer, welches 8 m weit von *b* entfernt ist, *n* eine unveränderlich aufgestellte Rolle von 618 Windungen, welche, von einem Strom durchlaufen, auf das Magnetometer wirkt. Der Strom geht von dem einen Pole der galvanischen Säule *a* zur Bifilarrolle, von dieser zum Commutator *c*, dann über die Rolle *f* zur Rolle *n*, von dieser zurück zum Commutator und von diesem endlich zum anderen Pole der Säule.

Durch den Commutator kann also die Stromrichtung in *f* und *n* geändert werden, während sie in der Bifilarrolle *b* stets dieselbe bleibt.

Fig. 724.



Es wurde nun bei jeder gegenseitigen Lage und Entfernung der beiden Drahtrollen *f* und *b* die Stellung von *m* und *b* für die eine Stromrichtung ermittelt, dann der Strom in *f* und *n* mittelst des Commutators umgekehrt und nochmals die Stellung von *b* und *m* abgelesen. Die Differenz der beiden Ablenkungen am Dynamometer giebt ein Maass für die Kraft, mit welcher die beiden Drahtrollen *b* und *f* auf einander wirken.

Da wir nun wissen, dass die elektrodynamische Wirkung der beiden Drahtrollen auf einander dem Quadrat der Stromstärke proportional sind, so ist man vermöge der am Magnetometer gemachten Messungen der Stromstärke im Stande, die gemessenen Ablenkungen der Bifilarrolle auf gleiche Stromstärke zu reduciren.

Diese Versuche gaben nun das wichtige Resultat, dass für die elektrodynamischen Wirkungen, welche diese beiden Drahtrollen in die Ferne auf einander ausüben, wirklich dieselben Gesetze gelten, wie für die gegenseitige Wirkung zweier Magnete.

220 **Ampère's Theorie des Magnetismus.** Nachdem Ampère die Gesetze der Elektrodynamik begründet hatte, suchte er alle Erscheinungen des Magnetismus auf dieselben zurückzuführen und stellte eine Theorie auf, nach welcher man sich jedes einzelne Molecül eines Magnets als von einem in sich selbst zurückkehrenden elektrischen Strom umkreist zu denken hat, den man der Einfachheit wegen als kreisförmig annehmen kann. Denken wir uns nun die sämmtlichen Molecularströmchen eines Stahlstabes rechtwinklig zu seiner Axe gestellt, so dass Fig. 725 das schematische Bild eines Querschnittes darstellt, so lässt sich die magnetische Wirkung des Stabes vollkommen durch die elektrodynamische Wirkung dieser Molecularströmchen erklären. Statt aller der elementaren Ströme eines jeden Querschnittes kann man sich denselben von einem einzigen Strome umkreist denken, welcher gleichsam die Resultirende aller elementaren Ströme dieses Quer-

schnittes ist, und somit lässt sich ein Magnetstab als ein System unter sich paralleler geschlossener Ströme denken, ungefähr so, wie es Fig. 726 anschaulich macht.

Was hier von einem Magnetstabe gesagt ist, lässt sich auch auf eine Magnetnadel, kurz, auf jeden Magnet, welche Form er auch haben mag, anwenden.

Um die Erklärung der Anziehung und Abstossung der Pole bei verschiedenen Stellungen der Magnete gegen einander recht anschaulich

Fig. 725.

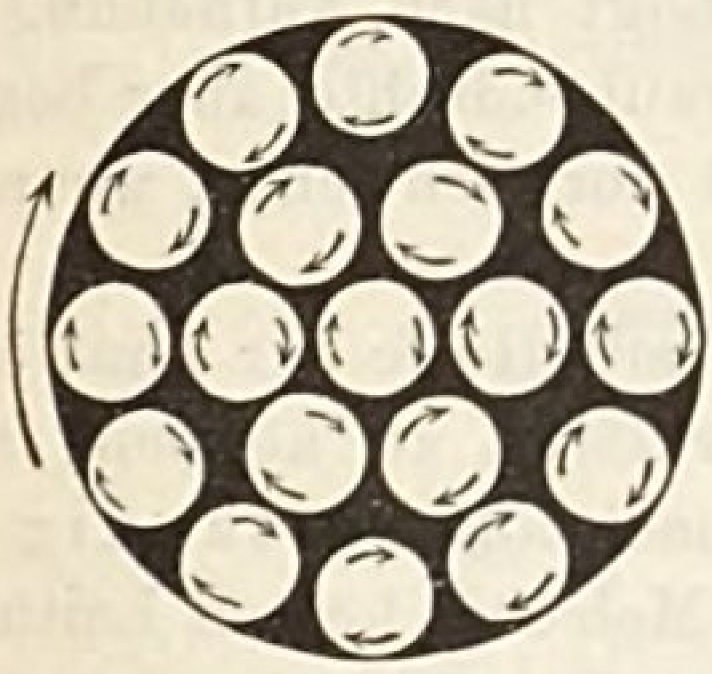
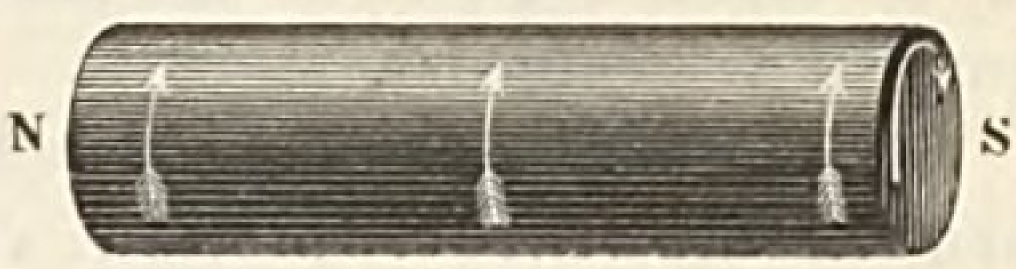
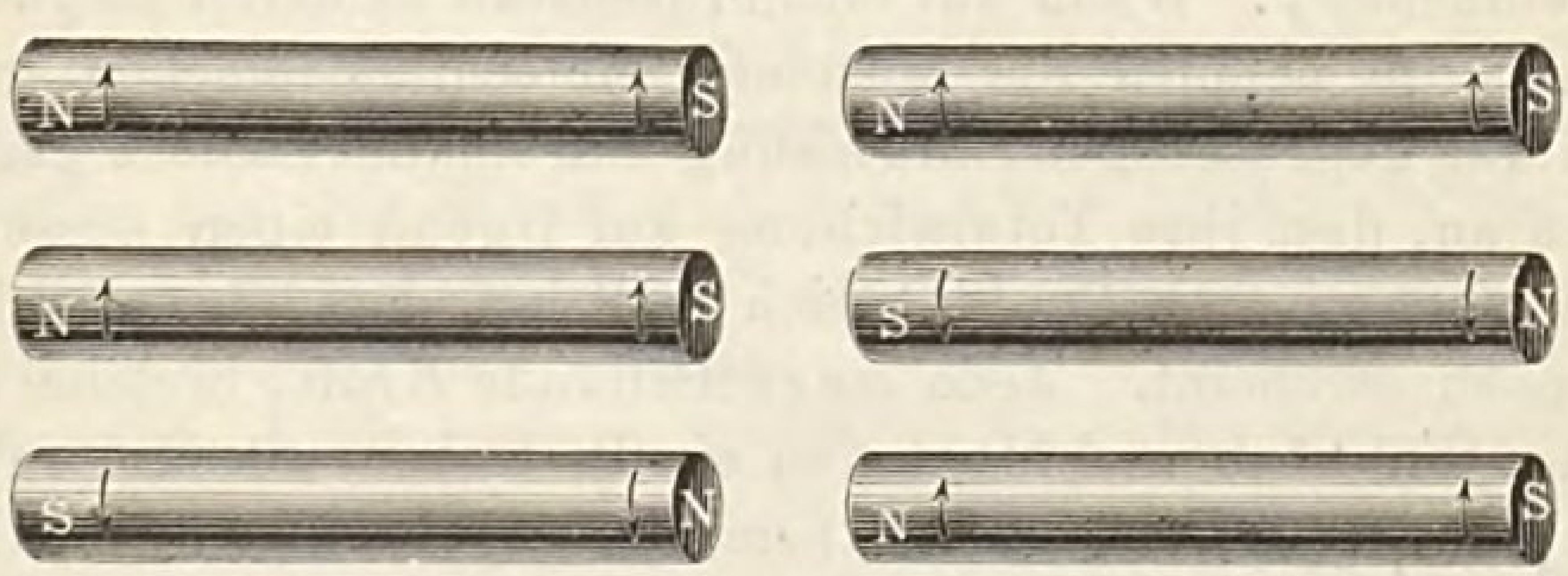


Fig. 726.



zu machen, zeichnet man am besten auf Cylinder von Holz oder Pappe, die ungefähr 30 bis 50 cm lang sind und 5 bis 7 cm im Durchmesser haben, Pfeile in der Weise, wie man Fig. 726 sieht, welche die Richtung der Ströme darstellen; ferner bezeichne man noch auf beiden Cylindern die Nordpole mit *N*, die Südpole mit *S*. Mit Hülfe zweier solcher

Fig. 727.



Modelle lässt sich leicht begreiflich machen, warum gleichnamige Pole sich immer abstossen, ungleichnamige immer anziehen, in welcher Weise sie man auch übrigens einander nähern mag.

Stellt man z. B. zwei Stäbe so, wie Nr. I., Fig. 727 zeigt, dass die ungleichnamigen Pole einander gegenüberstehen, so sind die Pfeile der einander gegenüberstehenden Pole gleich gerichtet, was einer Anziehung entspricht. Wenn dagegen die gleichnamigen Pole einander zugekehrt werden, wie in Nr. II. und III., Fig. 727, so haben die Pfeile an den einander zugekehrten Polen entgegengesetzte Richtung, woraus sich die Abstossung gleichnamiger Pole erklärt.

Trotz der Analogie zwischen einem elektrodynamischen Schraubendraht und einem Magnet sind dieselben doch keineswegs in allen ihren Wirkungen identisch. Während ein Magnet an seinen Enden am kräf-

tigsten wirkt, findet sich beim Schraubendraht das Maximum der Wirkung in der Mitte. Poggendorff hat dies durch einen einfachen Versuch anschaulich gemacht.

Man verschaffe sich einen hohlen Magnetstab, etwa 7 cm lang und inwendig 5 mm weit, füttere ihn mit einer Glasröhre aus und halte ihn senkrecht, z. B. mit dem Nordpol nach oben. Nun schiebe man vorsichtig eine leichte magnetische Nähnadel von etwa 2 cm Länge mit ihrem Südpol von oben hinein. Sie wird nicht durchfallen, sondern zum Theil noch aus dem Magnet hervorragend oben schweben. Man kann sie sogar eine Strecke hinunterdrücken, und sie steigt nach Aufhebung des Druckes wieder in die Höhe. Bei einem Schraubendrahte aber begiebt sich die Nadel sogleich in die Mitte und bleibt dort schweben, wenn der Strom stark genug ist.

Um die Erscheinungen des Magnetismus mit Hülfe der Ampère'schen Elementarströmchen vollständig erklären zu können, muss man annehmen, dass sie die Eisen- oder Stahlmolecüle beständig umkreisen, dass sie also auf ihrem Wege um die Molecüle keinen Leitungswiderstand zu überwinden haben, denn sonst könnten sie ohne eine beständig wiederkehrende elektromotorische Kraft nicht continuirlich sein. Diese Molecularströme muss man ferner als frei um den Schwerpunkt ihrer Molecüle drehbar annehmen, nur wirkt die Coërcitivkraft, welche im Eisen unbedeutend, im Stahl dagegen sehr stark ist, ihrer Drehung entgegen und strebt sie in jeder Lage zurückzuhalten, welche sie eben einnehmen. Wenn auf einen Eisenstab keinerlei magnetisirende Kraft wirkt, so nehmen die einzelnen Molecularströmchen unter dem Einfluss ihrer gegenseitigen Einwirkung auf einander solche gegenseitige Stellungen an, dass ihre Totalwirkung auf irgend einen ausserhalb befindlichen magnetischen Punkt gleich Null ist, dass also der Eisenstab unmagnetisch erscheint. Jede magnetisirende Kraft, welche auf einen Eisen- oder Stahlstab wirkt, hat nun ein Bestreben, alle Molecularströme einander parallel zu stellen, welchem die gegenseitige Einwirkung der Molecularströme unter einander entgegenwirkt. Je stärker die magnetisirende Kraft, desto mehr wird die Lage der Molecularströme dem Parallelismus genähert. Die Grenze der Magnetisirung ist erreicht, wenn sämmtliche Molecularströmchen parallel gestellt sind. Hört die Wirkung der magnetisirenden Kraft auf, so wirkt die gegenseitige Einwirkung der Strömchen dahin, sie in ihre ursprüngliche, dem unmagnetischen Zustande entsprechende Lage zurückzuführen; bei einem Stahlstab hindert die Coërcitivkraft die vollständige Rückkehr in die ursprüngliche Lage, weshalb demselben ein permanenter Magnetismus bleibt.

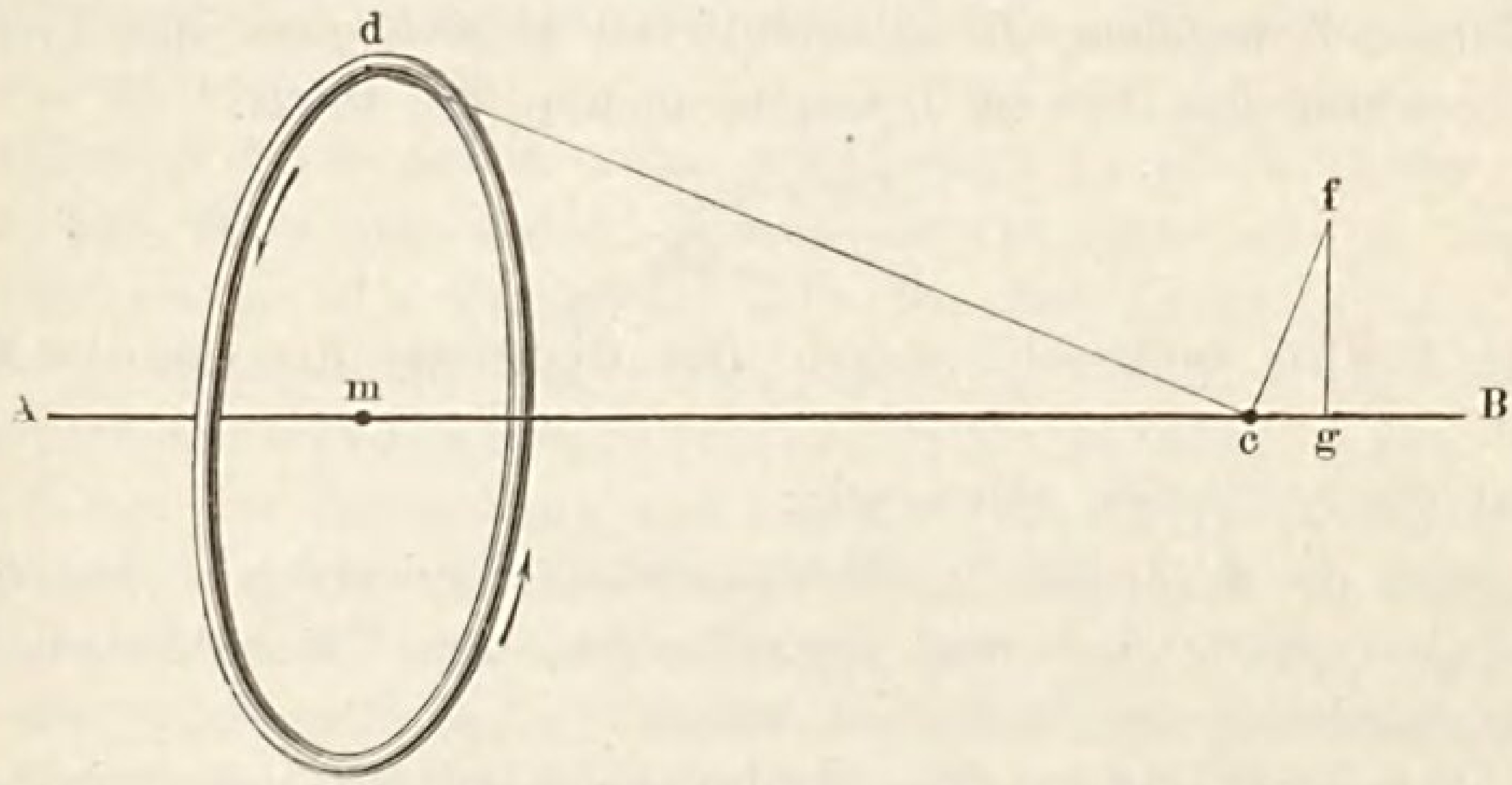
Um nach der Ampère'schen Theorie die Erscheinungen des Erdmagnetismus zu erklären, muss man sich die Erde von elektrischen Strömen umkreist denken, welche im Wesentlichen dem magnetischen Aequator parallel sind, und zwar lässt sich leicht aus der Stellung,

welche ein beweglicher Leiter, Fig. 703, S. 823, am Ampère'schen Gestell unter dem Einfluss des Erdmagnetismus einnimmt, der Schluss ziehen, dass die Erdströme von Ost nach West gehen.

Wenn die Annahme der Molecularströme auch nicht als theoretisch haltbar zu bezeichnen ist, so giebt sie doch ein bequemes Hülfsmittel ab, um eine grosse Gruppe von Erscheinungen von einem gemeinsamen Gesichtspunkte aus aufzufassen und abzuleiten.

Magnetisches Moment eines Kreisstromes. Fig. 728 stellt die perspectivische Ansicht eines kreisförmigen Stromes dar, dessen Ebene mit dem magnetischen Meridian zusammenfällt, so also, dass die 221

Fig. 728.



durch den Mittelpunkt des Kreisstromes rechtwinklig zu seiner Ebene gelegte Gerade AB auf dem magnetischen Meridian rechtwinklig steht. Wir wollen nun die Wirkung untersuchen, welche der Kreisstrom auf irgend ein magnetisches Element ausübt, welches sich in einem Punkte der Linie AB, etwa in c, befindet.

Wenn der Kreisstrom in der durch die Pfeile bezeichneten Richtung circulirt, so hat ein elementares Theilchen des Stromes, etwa das Theilchen bei d, ein Bestreben, ein nordmagnetisches Element in c nach der Richtung cf zu bewegen; die Grösse dieser bewegenden Kraft lässt sich nach absolutem Maasse durch

$$\frac{J \mu \varphi}{l^2}$$

darstellen, wenn J die Stärke des Kreisstromes, μ die Intensität des Magnetismus im magnetischen Theilchen c, φ die Länge des elementaren Bogenstücks bei d, l die Entfernung cd bezeichnet.

Setzen wir den Halbmesser des Kreises gleich r, die Entfernung $mc = x$, so ist $l^2 = x^2 + r^2$ und der obige Werth für die in der Richtung cf auf c wirkende Kraft wird

$$\frac{J \mu \varphi}{x^2 + r^2}.$$

Zerlegt man die Kraft cf nach der Richtung der Ringaxe und rechtwinklig auf dieselbe, so ist es leicht, den Werth der Componente cg zu bestimmen, denn es verhält sich $cf : cg = cd : dm$, oder $cf : cg = l : r$, mithin ist

$$cg = \frac{cf \, . \, r}{l} = \frac{cf \, . \, r}{\sqrt{x^2 + r^2}},$$

oder endlich

$$cg = \frac{J \mu \varphi r}{(x^2 + r^2)^{3/2}}.$$

Setzen wir nun in diesen Werth von cg für das Bogenelement φ den ganzen Umfang $2 \pi r$ des Kreisstromes, so ergiebt sich als Resultat der Kräfte, mit welchen alle Elemente des Kreisstromes das Theilchen c in der Richtung der Axe zu bewegen suchen, die Kraft:

$$\frac{2 \pi r^2 \mu J}{(x^2 + r^2)^{3/2}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 1)$$

Die Kräfte senkrecht gegen die Richtung der Axe AB heben sich auf.

Aus dieser Formel sehen wir:

1) dass die magnetische Wirkung eines Kreisstromes dem Quadrate seines Halbmessers oder, was dasselbe ist, dem Flächeninhalt des umströmten Kreises proportional ist, und

2) dass die Wirkung eines Kreisstromes auf ein magnetisches Theilchen, welches auf seiner Axe liegt, sich umgekehrt verhält, wie die dritte Potenz der Entfernung $\sqrt{x^2 + r^2}$ des magnetischen Theilchens von der Peripherie des Kreisstromes, dass also die magnetische Wirkung eines Kreisstromes in die Ferne denselben Gesetzen folgt, wie die Totalwirkung eines Magnets.

Unter der Intensität des magnetischen Feldes an irgend einem Punkte versteht man die Kraft, womit daselbst ein Magnetstab vom Momente $\mu = 1$ angegriffen wird. Setzen wir also in 1) $\mu = 1$, so erhalten wir für die Intensität des magnetischen Feldes an einem Punkte auf der Axe mc, der um x von m entfernt liegt, den Ausdruck

$$F_x = \frac{2 \pi r^2 J}{(x^2 + r^2)^{3/2}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 2)$$

Setzen wir nun $x = 0$, so erhalten wir die Intensität des magnetischen Feldes im Mittelpunkte m des Kreisstromes

$$F_0 = \frac{2 \pi J}{r} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 3)$$

Dies ist dieselbe Formel, die wir bereits im §. 121 (Seite 402) abgeleitet haben.

Die dynamoelektrische oder Volta-Induction. Die 222
Gesetze der Magnetoinduction lehren uns, dass in jedem Leiter, der sich im Felde eines Magneten so bewegt, dass er die Kraftlinien desselben durchschneidet, eine elektromotorische Kraft geweckt wird. Da nun im vorausgehenden Paragraphen gezeigt wurde, dass auch stromdurchflossene Leiter von einem System von Kraftlinien, also von einem magnetischen Felde umgeben sind, so ist von vornherein zu erwarten, dass auch in einem Leiter, der in der Nähe eines stromdurchflossenen Leiters so bewegt wird, dass er die Kraftlinien des letzteren schneidet, eine elektromotorische Kraft, eventuell ein Inductionsstrom erzeugt werde. Faraday, welcher diese Inductionswirkung zuerst entdeckt hat, nannte dieselbe, zum Unterschiede von der durch Magnete hervorgebrachten, Voltainduction; die systematische Bezeichnung ist dynamoelektrische Induction.

Betrachten wir zunächst zwei geradlinige parallele Leiter, von denen nur der eine von einem Strome durchflossen sei, so ergiebt sich aus dem im §. 215 Gesagten, dass bei der Annäherung beider Leiter die Kraftlinien des ersten derartig geschnitten werden, dass im zweiten ein entgegengesetzter Strom entstehen muss. Umgekehrt wird bei der Entfernung des Leiters vom Strom in jenem ein gleichgerichteter Strom entstehen. Es ist dies auch im Einklang mit dem Gesetz von Lenz, welches sagt, dass jede Bewegung eines Leiters in einem magnetischen Felde einen Strom erzeugt, welcher der Bewegung, durch die er entstand, entgegen wirkt. Annäherung eines parallelen Leiters an einen Strom muss daher einen abstossenden Strom wecken, also einen entgegengerichteten. Entfernung eines parallelen Leiters muss einen anziehenden Strom erzeugen, also einen gleich gerichteten. Wir haben daher folgenden eigenthümlichen Sachverhalt: Ein stromdurchflossener und ein ihm paralleler stromloser Leiter wirken, so lange der Strom constant bleibt, auf einander weder anziehend noch abstossend ein. Sobald und so lange man sie aber einander nähert, wirken sie abstossend auf einander, sobald und so lange man sie von einander entfernt, wirken sie anziehend auf einander. Jede dieser gegenseitigen Bewegungen wird also von den Strömen gehemmt und erfordert daher Arbeit von aussen und diese Arbeit liefert die Energie für den Inductionsstrom.

Es ist nun aber einleuchtend, dass in dem Momente, wo der ursprünglich stromlose Leiter auf diese Weise einen Inductionsstrom erhält, er ebenfalls Kraftlinien erhält, dass also auch in dem ursprünglichen stromdurchflossenen Leiter ein Inductionsstrom zu dem ursprünglichen hinzutreten muss, weil er diese Kraftlinien durchschneidet. Die Richtung dieses Inductionsstroms ist in beiden Fällen übereinstimmend mit jener des ursprünglichen Stromes. Fassen wir das Resultat zusammen:

I. Nähert man einem durchströmten Leiter einen parallelen ursprünglich stromlosen Leiter, so wird der

Strom des ersteren verstärkt, der letztere erhält einen entgegengesetzten Strom.

II. Entfernt man von einem durchströmten Leiter einen parallelen ursprünglich stromlosen Leiter, so wird der Strom des ersteren verstärkt, der letztere erhält einen gleichgerichteten Strom.

Es ist nun nicht schwierig, zu bestimmen, was geschehen wird, wenn man zwei durchströmte parallele Leiter einander nähert, oder von einander entfernt; man braucht nur auf das Gesetz von Lenz zu achten.

III. Zwei gleichgerichtete Ströme schwächen einander beim Annähern, stärken einander beim Entfernen.

IV. Zwei entgegengesetzte Ströme verstärken einander beim Annähern, schwächen einander beim Entfernen.

Zu jeder Stromverstärkung ist Energie von aussen zuzuführen; bei jeder Stromschwächung giebt das Leitersystem nach aussen Energie ab.

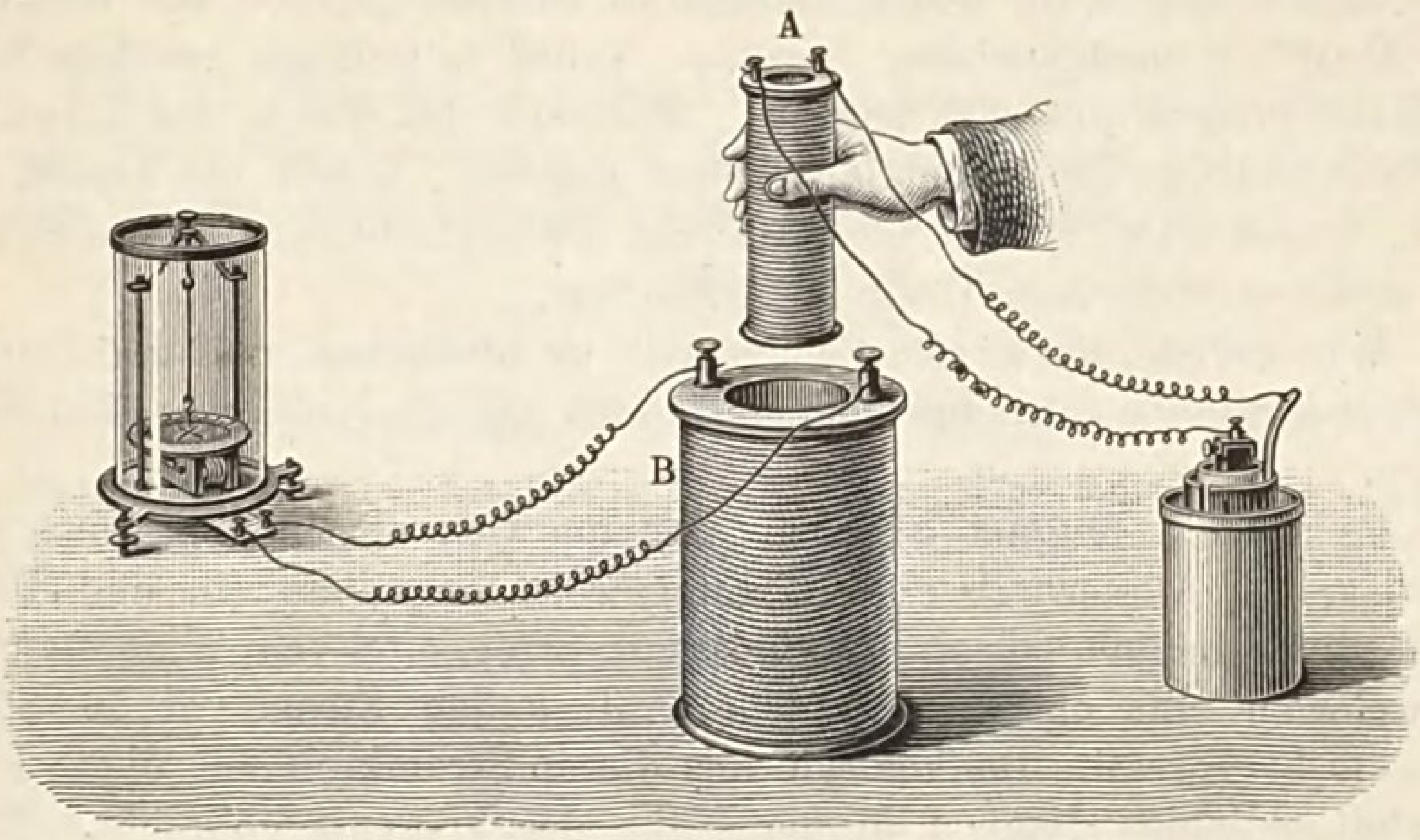
Es versteht sich von selbst, dass nur in geschlossenen Leitern kreisförmig geschlossene Ströme entstehen können; bei offenen Leitern kann nur eine Anhäufung der Elektricitäten gegen die Enden eintreten, welche sich dann wieder rückwärts ausgleichen, sobald die elektromotorische Kraft erlischt. Gehen wir daher zu parallelen Stromkreisen über. Auch bei diesen haben die Kraftlinien eine solche Lage (Fig. 700, S. 821), dass bei der Annäherung eines Kreises an einen zweiten auf derselben Axe befindlichen die Kraftlinien durchschnitten werden. Es gelten demnach die obigen vier Regeln auch für Stromkreise. Begreiflicherweise wird die Inductionswirkung gesteigert, wenn man statt einfacher Kreise Drahtspiralen mit vielen Umgängen benutzt. Mit solchen lassen sich demnach die Inductionsströme leichter nachweisen. Man pflegt dabei jene Spirale, welche einen Strom von aussen zugeführt erhält, die Hauptspirale oder primäre Spirale, die andere, in welcher der Inductionsstrom hervorgerufen werden soll, die Nebenspirale oder secundäre Spirale zu nennen.

Zur Anstellung des Versuches könnte man die in Fig. 706, S. 824, abgebildeten Buff'schen Bandspiralen benutzen, indem man die Enden der einen (primären) Spirale mit einer Batterie, die Enden der anderen (secundären) mit einem Galvanometer verbindet und hierauf die Spiralen abwechselnd einander nähert und von einander entfernt.

Aus später zu erörternden Gründen pflegt man gewöhnlich — aber nicht immer — die primäre Spirale aus wenigen Windungen dickeren Drahtes, die secundäre Spirale aus vielen Windungen dünneren Drahtes herzustellen. Da sich die elektromotorischen Kräfte der letzteren Windungen alle addiren, so erhält man dann einen secundären Strom von grösserer elektromotorischer Kraft, als der primäre Strom besitzt.

Die Fig. 729 zeigt die Anordnung eines solchen Versuchs. *A* stellt die primäre, *B* die secundäre Spirale vor; letztere ist mit dem Multiplicator, erstere mit einem Bunsen-Elemente verbunden. Nähert man die Spirale *A* der Spirale *B* oder schiebt sie gar in letztere hinein, so entsteht in *B* der entgegengerichtete Inductionsstrom, der aber sofort er-

Fig. 729.



lischt, sobald die Bewegung aufhört. Beim Herausziehen der Spule *A* entsteht dann der gleichgerichtete Inductionsstrom in *A*. Beim Hineinführen von *A* in *B* werden allerdings nicht bloss primäre Windungen und secundäre einander genähert, sondern zum Theil auch wieder von einander entfernt. Offenbar überwiegt aber die Zahl der Annäherungen, bis die symmetrische Lage erreicht ist. Ob die secundäre Spirale die primäre umgiebt oder umgekehrt, ist im Wesentlichen gleichgültig.

Fig. 730.

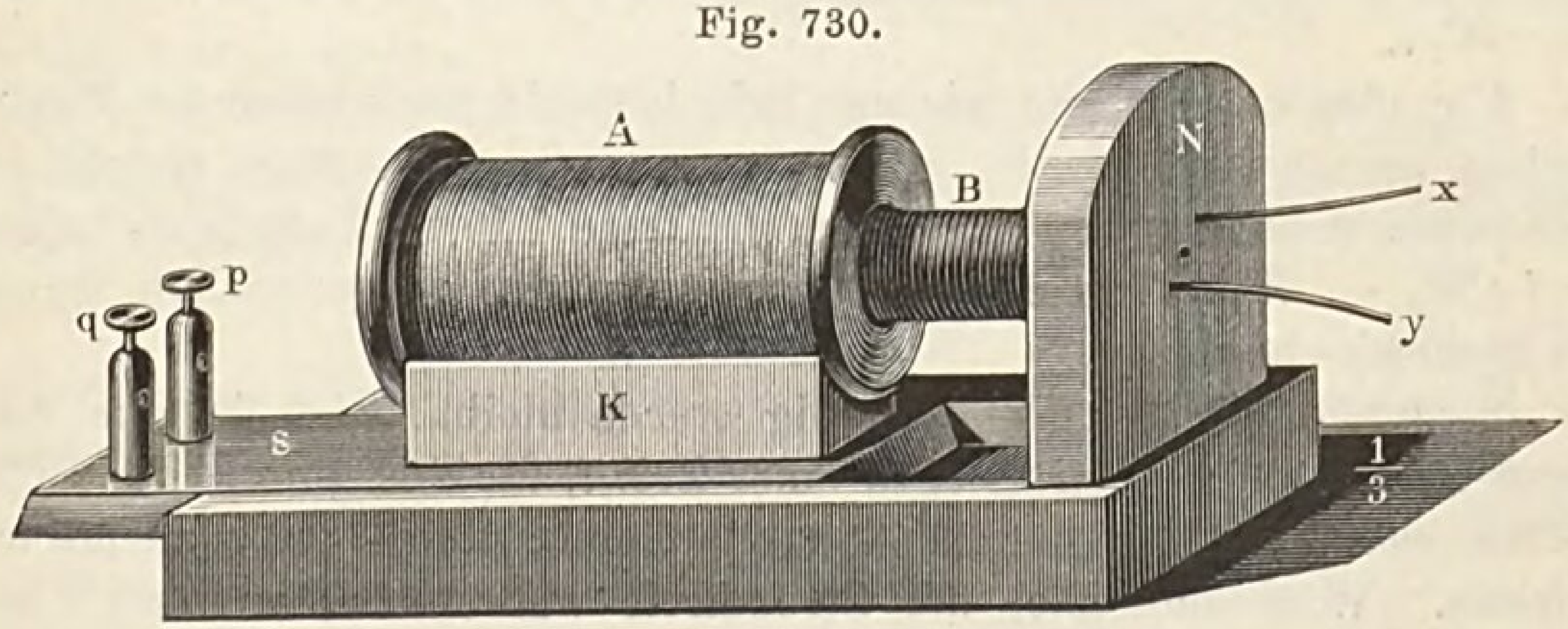


Fig. 730 zeigt einen ähnlichen Apparat, der unter dem Namen des Schlittenapparates von Du Bois-Reymond bekannt und insbesondere für physiologische Versuche bestimmt ist. Hier ist *A* die innere primäre Spirale, *B* die äussere secundäre. Die erstere ist an dem Träger *N* befestigt, die letztere auf einem Schlitten verschiebbar.

223 **F. E. Neumann's Inductionsgesetz, Strompotential, Inductionscoëfficient.** Schon im §. 190 haben wir darauf hingewiesen, dass die Energie des Magnetoinductionsstroms aus der Arbeit stamme, welche aufgewendet werden muss, um Magnet und Stromleiter aus ihrer gegenseitigen Lage zu bewegen. Dasselbe ist nun auch bei der Voltainduction der Fall. Dieser Zusammenhang ist zuerst von H. v. Helmholtz in seiner berühmten Schrift „Ueber die Erhaltung der Kraft" *) nachgewiesen worden, wobei allerdings vereinfachende Voraussetzungen gemacht wurden. Während das Gesetz von Lenz nur die Richtung der Inductionsströme angiebt, liefert das Gesetz von F. E. Neumann**) den quantitativen Zusammenhang für die Stärke der elektromotorischen Kraft der Induction.

Wir wollen, um diesen Sachverhalt zu übersehen, nochmals auf die Magnetoinduction zurückgreifen und dann auf die Voltainduction übergehen.

Es sei ein Magnet gegeben, der um sich ein magnetisches Feld entwickelt. Ausserhalb der Wirkungsweite desselben (in unendlicher Entfernung) befinde sich ein geschlossener Stromleiter vom Widerstande w, in welchem eine elektromotorische Kraft e den Strom von der Stärke $i = ew$ hervorruft. Denken wir uns diesen Stromkreis aus dieser Ferne in eine beliebige Lage I in der Nähe des Magnets gebracht. Wenn während dieser Bewegung Magnet und Strom unverändert blieben, so würde dabei ein gewisses Arbeitsquantum in Form von lebendiger Kraft gewonnen oder zur Ueberwindung des Widerstandes aufgewendet werden. Das System „Magnet und Stromkreis" hat also an potentieller Energie gewonnen oder verloren. Wir nennen diesen Zuwachs an potentieller Energie das Potential des Stromes i auf den Magnet in der Lage I. Bezeichnen wir diese Grösse für den Fall, dass der Strom die Stärke 1 hätte, mit W_1, so ist das Potential des Stromes $i = W_1 i$.

Für eine Lage II, die wir uns beispielsweise noch näher am Magnete denken, sei dieses Potential $= W_2 i$. Dann ist die Arbeit, welche man aufwenden muss, um den Strom aus der Lage I in die Lage II zu bringen, $= i\,(W_2 - W_1)$. Um diesen Betrag muss also die potentielle Energie des Systems zunehmen.

So lange der Stromkreis ruhig stehen bleibt, wird in ihm durch die elektromotorische Kraft e, in einer Zeit t, die Energie eit entwickelt, welche sich gleichzeitig nach Joule's Gesetz in die Stromwärme $w\,i_2\,t$ umsetzt. Wird nun aber der Stromkreis während dieser Zeit t noch aus der Lage I in die Lage II gebracht, so kommt zu der Stromenergie eit noch die Energie $i\,(W_2 - W_1)$ dazu. Es ist also nach dem Principe, dass keine Energie verloren gehen könne:

*) S. 67, Berlin 1847.

**) Abh. d. Berliner Akad. 1845, 1847.

$$eit + i\,(W_2 - W_1) = w\,i^2 t$$

woraus:

$$w\,i = e + \frac{W_2 - W_1}{t}.$$

Das heisst in Worte übertragen: Zu der aus dem Ohm'schen Gesetze folgenden elektromotorischen Kraft $wi = e$ kommt während der Bewegung noch eine elektromotorische Kraft von der Grösse $\frac{W_2 - W_1}{t}$ dazu. Dies ist eben die elektromotorische Kraft des Inductionsstroms. Für den Fall, dass die Bewegung nicht durch äussere Arbeit, sondern von dem System selbst hervorgebracht wurde, ist natürlich:

$$w\,i = e - \frac{W_2 - W_1}{t},$$

also der Inductionsstrom dem ursprünglichen entgegen gerichtet.

Die elektromotorische Kraft der Induction ist also gleich der Aenderung des Potentials für den Strom 1 in der Zeit 1.

Bei dieser Ableitung ist auf den Umstand keine Rücksicht genommen, dass der Magnet durch den entstandenen Inductionsstrom ebenfalls eine Aenderung erfährt.

Gehen wir nun zur Voltainduction über, so tritt an die Stelle des Magnets der eine Stromkreis, dem wir den anderen Stromkreis nähern. An Stelle des Potentials zwischen Stromkreis und Magnet tritt das Potential der beiden Stromkreise auf einander. Will man dabei nicht, wie vorhin, die Rückwirkung des entstandenen Inductionsstroms vernachlässigen, so kann man, nach J. Stefan *), zu einer richtigen Ableitung für die elektromotorischen Kräfte der Inductionsströme gelangen, indem man statt einer einfachen Verschiebung einen ganzen Kreisprocess ins Auge fasst, bei welchem zuletzt beide Stromleiter wieder in der Anfangslage sich befinden.

In zwei Stromkreisen von den Widerständen w und w' erzeugen die (chemischen) elektromotorischen Kräfte e und e' die constanten Ströme von den Intensitäten J und J', so dass also:

$$e = wJ, \quad e' = w'J' \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

Indem wir die Stromkreise während der Zeit t ihrer gegenseitigen Einwirkung überlassen, wobei sie sich je nach der Stromrichtung anziehen oder abstossen, erzeugen dieselben eine gewisse lebendige Kraft, die wir mit l bezeichnen. Dabei sinken ihre Stromstärken J und J' auf die Werthe $J - i$ und $J' - i'$ herab, wobei i und i' die Intensitäten der inducirten Gegenströme vorstellen.

*) Ueber die Gesetze der elektrodynamischen Induction, Wien. Akad. Ber. LXIV, 2, S. 193 (1871).

Am Ende der Zeit t, die wir uns so klein vorstellen, dass wir während derselben i und i' als constant ansehen können, denken wir uns die Stromleiter festgehalten, worauf sofort die Inductionsströme erlöschen und die Intensitäten wiederum die Werthe J und J' annehmen. Die während der Zeit t von den chemischen Kräften e und e' gelieferte Energie ist:

$$A_1 = e\,(J - i)\,t + e'\,(J' - i')\,t,$$

die in derselben Zeit in den Leitern entwickelte Wärme beträgt:

$$W_1 = w\,(J - i)^2\,t + w'\,(J' - i')^2\,t.$$

Bezeichnen wir das Potential der beiden Ströme auf einander, d. h. die Arbeit, welche aufgewendet werden müsste, um die beiden vom Strom 1 durchflossenen Leiter aus unendlicher Entfernung in die Anfangslage zu bringen, mit V_1, ebenso für die Endlage mit V_2, so ist $(V_2 - V_1)$ die Arbeit, um die beiden Ströme mit der Intensität 1 aus der Anfangslage in die Endlage zu bringen. Sind aber die Stromstärken $J - i$ und $J' - i'$, so ist diese Arbeit:

$$L_1 = (J - i)\,(J' - i')\,(V_2 - V_1).$$

Bringen wir jetzt unter Aufwand von aussen zugeführter Arbeit während einer gleich langen Zeit t die Leiter in die Anfangslage zurück, so werden während dieser Bewegung ihre Stromstärken um ebenso viel gesteigert, als sie früher vermindert wurden; sie werden also $J + i$ und $J' + i'$; die von den chemischen Kräften während der Bewegung gelieferte Energie ist:

$$A_2 = e\,(J + i)\,t + e'\,(J' + i')\,t,$$

die gleichzeitig erzeugte Wärme ist:

$$W_2 = w\,(J + i)^2\,t + w'\,(J' + i')^2\,t,$$

die äussere Arbeit:

$$L_2 = -\,(J + i)\,(J' + i')\,(V_2 - V_1).$$

Hält man am Ende der Zeit t die Leiter wiederum fest, so kehren die ursprünglichen Stromstärken wieder und ist Alles wieder im ursprünglichen Zustande, nur dass ein Betrag chemischer Energie verschwunden und dafür ein Betrag Wärme und ein Betrag (positiver oder negativer) äusserer Arbeit entstanden ist. Nach dem Princip der Erhaltung der Energie muss demnach erfüllt sein die Gleichung:

$$A_1 + A_2 = W_1 + W_2 + L_1 + L_2.$$

Setzt man dafür die angegebenen Werthe ein, so erhält man nach Ausführung der Reductionen und mit Rücksicht auf die Gleichungen 1):

$$w i^2 + w' i'^2 = J i' \,\frac{V_2 - V_1}{t} + J' i \,\frac{V_2 - V_1}{t},$$

welche Gleichung erfordert, dass die beiden Gleichungen erfüllt seien:

$$wi = J' \frac{V_2 - V_1}{t}, \quad w'i' = J \frac{V_2 - V_1}{t}.$$

Die Producte wi und $w'i'$ stellen aber die elektromotorischen Kräfte ε und ε' der beiden Inductionsströme i und i' vor. Man erhält also für dieselben die Gleichungen:

$$\varepsilon = J' \frac{V_2 - V_1}{t}, \quad \varepsilon' = J \frac{V_2 - V_1}{t} \quad \ldots \ldots \quad 2)$$

Das heisst in Worten: Wenn zwei Stromkreise in ihrer gegenseitigen Lage verschoben werden, so ist die in jedem der Leiter inducirte elektromotorische Kraft proportional der Stromstärke des inducirenden Stroms und der Aenderung des Potentials der beiden Stromkreise auf einander, ferner verkehrt proportional der Zeitdauer der Verschiebung.

Setzen wir auch hier die Stromintensitäten J und J' und die Zeit $t = 1$, so gelangen wir zur nämlichen Definition wie oben: Die elektromotorische Kraft der Induction ist gleich der Aenderung des Potentials für den Strom 1 in der Zeit 1.

Wenn ein galvanisches Element von der elektromotorischen Kraft $= e$ einen Strom i liefert, so ist, wie wir seinerzeit gezeigt haben, die in der Zeit t gelieferte Stromarbeit $= eit$. Es ist somit die elektromotorische Kraft gleich der Stromarbeit, welche beim Strom 1 in der Zeiteinheit geliefert wird. Um einen gleichen Betrag muss aber auch die potentielle Energie der chemischen Bestandtheile des Elementes vermindert worden sein. Die Definitionen sind also ganz analoge.

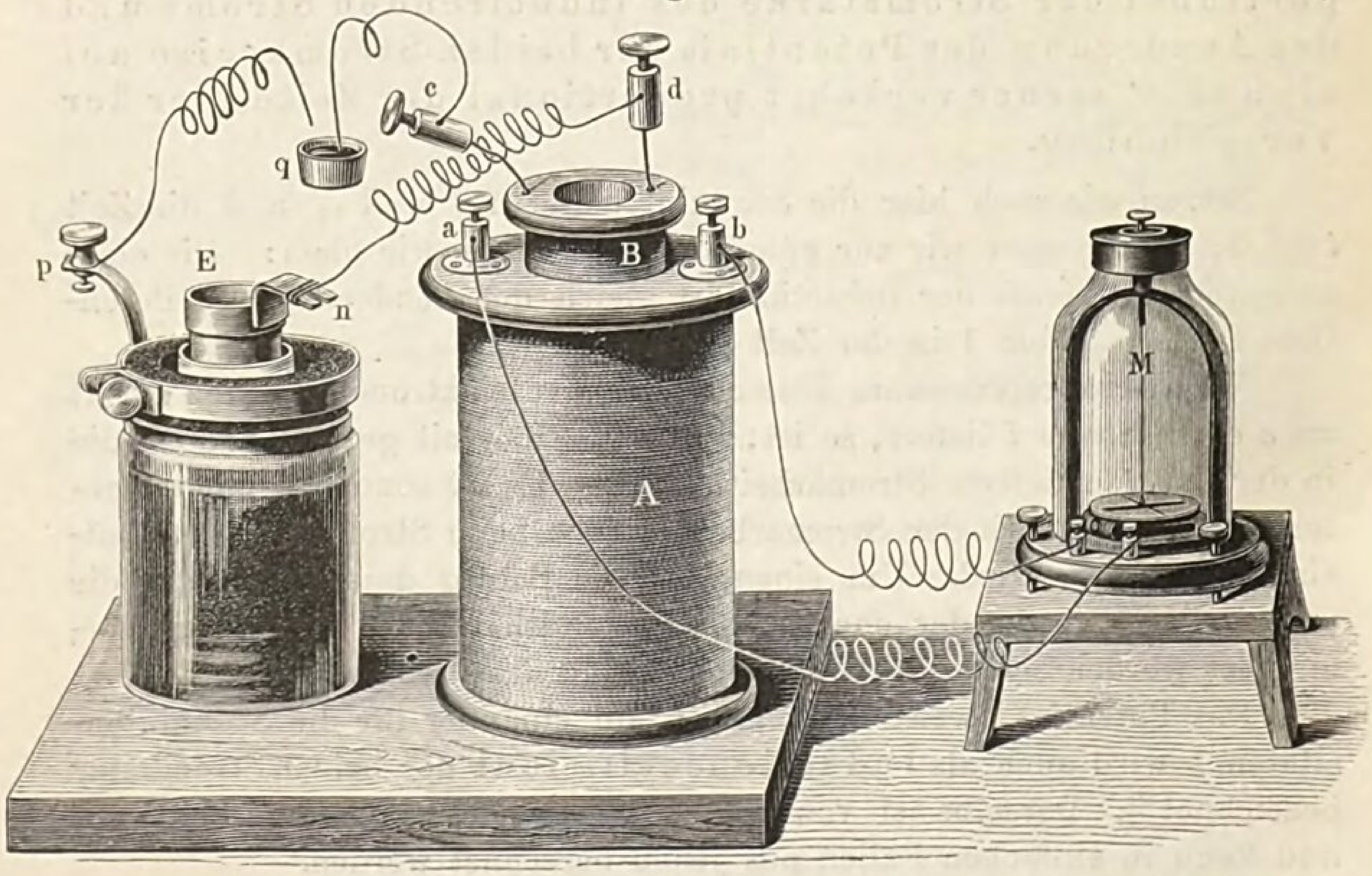
Das Potential zweier Stromkreise auf einander für die Stromintensitäten 1 wird auch als Inductioncoëfficient der beiden Stromleiter bezeichnet*). Derselbe ist von Gestalt und gegenseitiger Lage abhängig und kann in einfachen Fällen aus jenen berechnet werden.

Da auch die einzelnen Stromelemente eines und desselben Leiters auf einander Kräfte ausüben, so ist Arbeit erforderlich, um dieselben aus unendlicher gegenseitiger Entfernung in ihre Lage zu bringen. Diese Arbeit heisst das Potential des Stromleiters auf sich selbst. Für den Strom $= 1$ heisst diese Grösse auch Coëfficient der Selbstinduction.

*) Der Inductionscoëfficient ist nicht zu verwechseln mit der „Inductionsconstante"; die letztere ist ein constanter Factor, welcher den Formeln 2) anzufügen ist, wenn die elektrischen Grössen nicht nach dem einheitlichen absoluten Maasssystem gemessen werden. Für das letztere wird die Inductionsconstante $= 1$ und verschwindet daher.

224 **Inductionsströme in Folge momentanen Entstehens und Aufhörens von Strömen oder Magnetismen.** Aus der bisherigen Darstellung haben wir erfahren, dass ein Inductionsstrom in einem geschlossenen Leiter entsteht, während ein Strom oder ein Magnet genähert oder entfernt wird. Die elektromotorische Kraft derselben ist um so grösser, je rascher die Annäherung oder Entfernung erfolgt. Wenn man nun die primäre Spirale schon vorher in die secundäre hineingesteckt hat und nachher erst den primären Strom schliesst, so ist dies von derselben Wirkung, wie wenn man mit Blitzesschnelle die geschlossene primäre Rolle aus unendlicher Ferne in die secundäre hineingeführt hätte. Ebenso entspricht die Oeffnung des primären

Fig. 731.



Stromes einer plötzlichen Entfernung in unwirksame Distanz. In analoger Weise könnte man das plötzliche Hineinführen eines Magnets in die secundäre Spirale ersetzen durch ein plötzliches Magnetisiren oder Entmagnetisiren eines weichen Eisenkerns, welcher sich von vornherein in der secundären Spirale befindet.

Der erste Fall ist sofort mittelst des Apparates Fig. 731 herzustellen. Man braucht nur, ohne die Spirale B herauszunehmen, bei q abwechselnd den primären Strom zu schliessen und zu öffnen. Im Moment des Schliessens entsteht ein entgegengerichteter, im Moment des Oeffnens ein gleichgerichteter Inductionsstrom in A, welcher aber nur momentane Dauer hat. Zu diesem Experimente ist es übrigens gar nicht einmal nöthig, dass die beiden Drähte auf besonderen Spulen aufgewickelt seien; es genügt, auf eine und dieselbe Spule, Fig. 732, den primären Rr und den secundären Gg Leitungsdraht gut isolirt aufzuwickeln.

Um endlich durch momentanes Entstehen oder Aufhören des Magnetismus eines in der secundären Spirale enthaltenen Eisenkerns Inductionsströme hervorzurufen, hat man nur nöthig, diesen Eisenkern mit einem magnetisirenden Gewinde zu umgeben, durch welches man einen Strom schickt, den man beziehungsweise wieder unterbricht. Freilich wird man dann nicht verhindern können, dass derselbe Strom auch direct inducirend auf die secundäre Spirale wirkt; da jedoch die Wirkungen

Fig. 732.

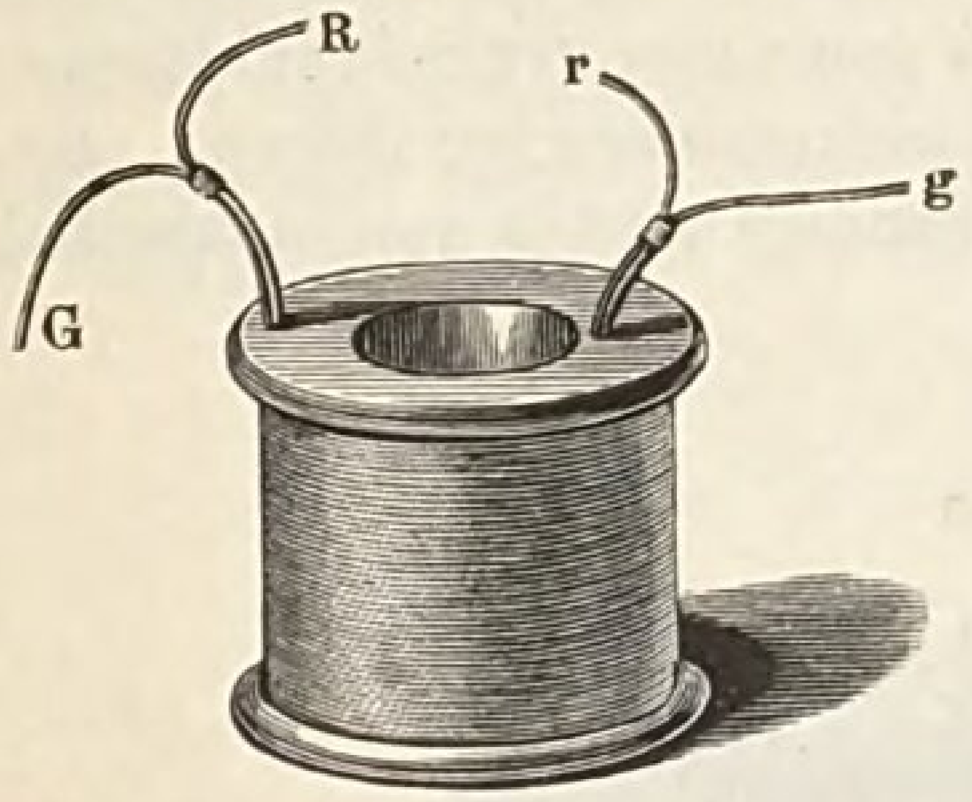
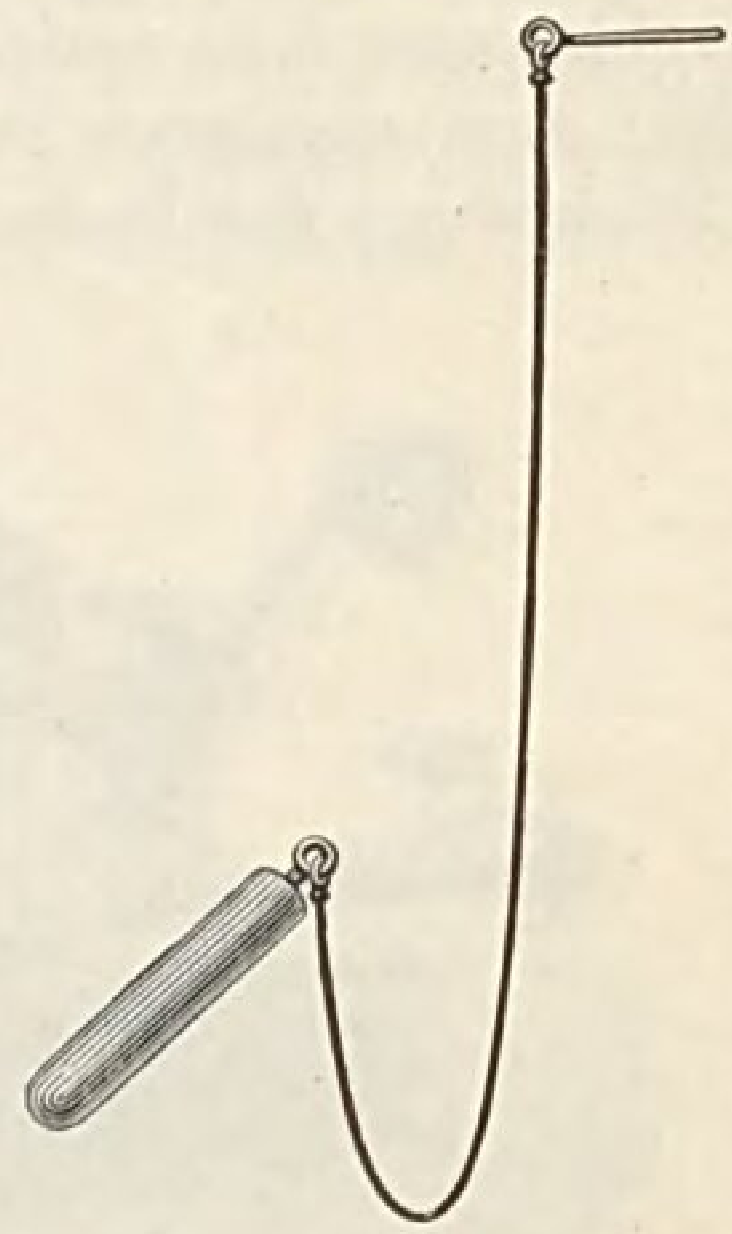


Fig. 733.



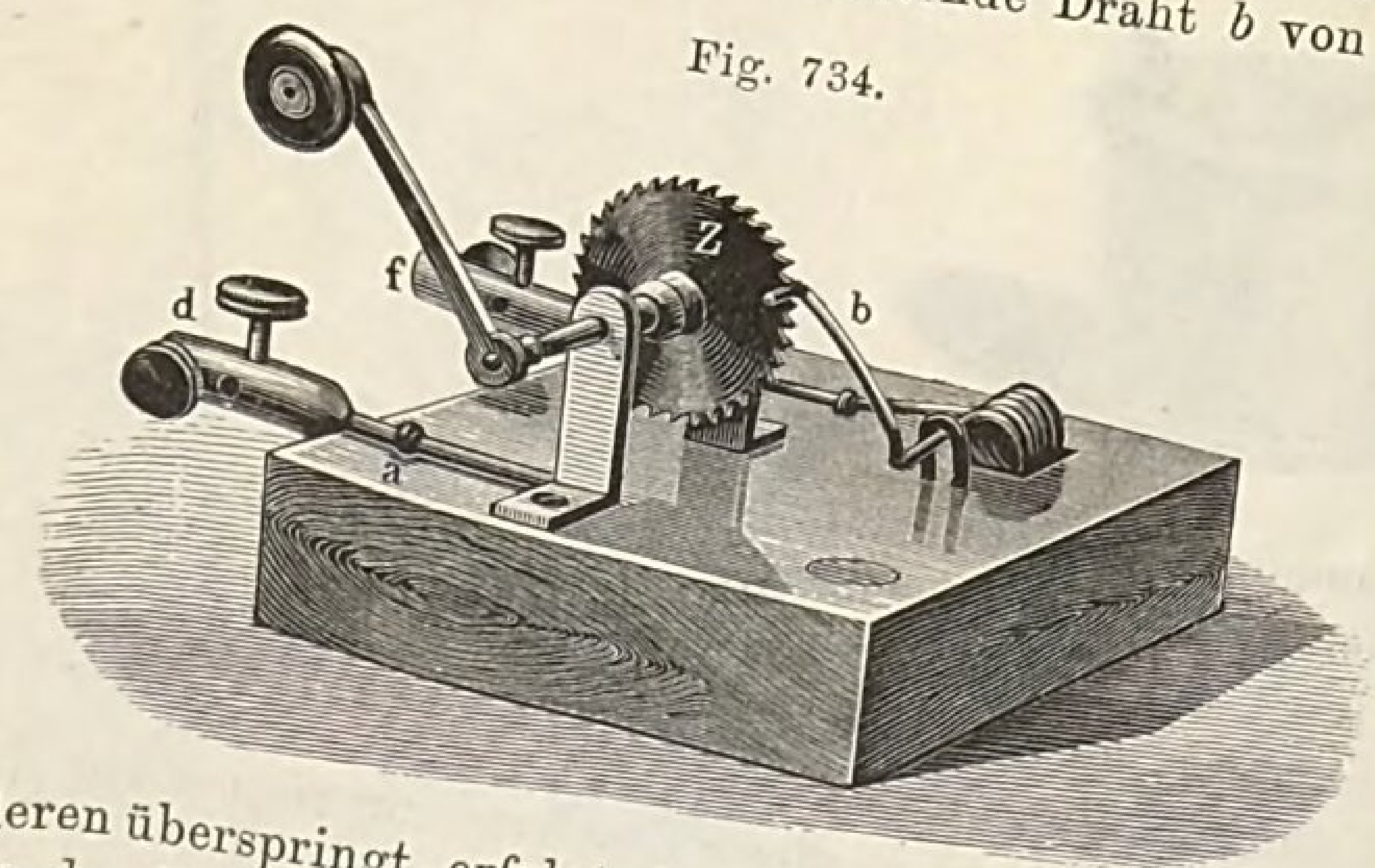
des entstehenden Magnets und des entstehenden Stromes einerlei Art sind, sich also unterstützen, ebenso wie das Aufhören des Magnetismus und die Unterbrechung des Stromes im selben Sinne wirken, so ist dieser Umstand zur Steigerung der Inductionswirkung nur förderlich.

Man wird also in der Regel so verfahren, dass man von vornherein in die primäre Spule B der Fig. 731 einen Eisenkern einsetzt. Beim Schliessen und Oeffnen des Stromes in q erhält man dann, wie die Galvanometerausschläge zeigen, bedeutend stärkere Inductionsströme als mit der Spule B allein. Uebrigens benöthigt man zum Nachweis dieser Ströme gar kein Galvanometer, da dieselben sehr kräftige physiologische Wirkungen hervorbringen, welche sich jenen der Entladungen statischer Elektricität nähern. Um die Schläge der Inductionsströme durch den Körper gehen zu lassen, braucht man bloss die Drahtenden der Nebenspirale mit metallenen Griffen zu versehen (Fig. 733) und diese in die etwas befeuchteten Hände zu nehmen. So oft nun der Hauptstrom geöffnet oder geschlossen wird, erhält man einen Schlag.

Unterbrechungs-Vorrichtungen. Um die physiologische Wirkung recht fühlbar zu machen, muss man eine Reihe von Oeffnungs- und Schliessungsschlägen in rascher Aufeinanderfolge durch den Körper senden. Man hat zu diesem Zwecke verschiedene Vorrichtungen construirt, welche man Rheotome nennen kann und von denen wir die zweckmässigsten näher betrachten wollen. 225

Das einfachste Rheotom ist wohl das Unterbrechungsrad, Fig. 734. Auf einem Holzklotz stehen zwei Messingpfeiler, welche die metallene Axe eines messingenen Zahnrades *Z* tragen, dessen Zähne so geschnitten sind, wie die Zähne des Steigrades einer gewöhnlichen Pendeluhr. An dem einen Messingpfeiler ist der Kupferdraht *a* befestigt, während ein zweiter Kupferdraht *b* federnd gegen das Rad drückt. Um das Unterbrechungsrad sammt der Hauptspirale in den Schliessungsbogen des elektromotorischen Bechers einzuschalten, braucht man nur das eine Ende der Spirale mit dem positiven Pole des Bechers, das andere mit der Schraubklemme *d* zu verbinden und dann von der Schraubklemme *f* einen Draht zum negativen Pole des Elektromotors zu führen. So oft nun bei Umdrehung des Rades der federnde Draht *b* von einem Zahne

Fig. 734.



zum anderen überspringt, erfolgt ein Oeffnen und ein alsbaldiges Wiederschliessen der Kette.

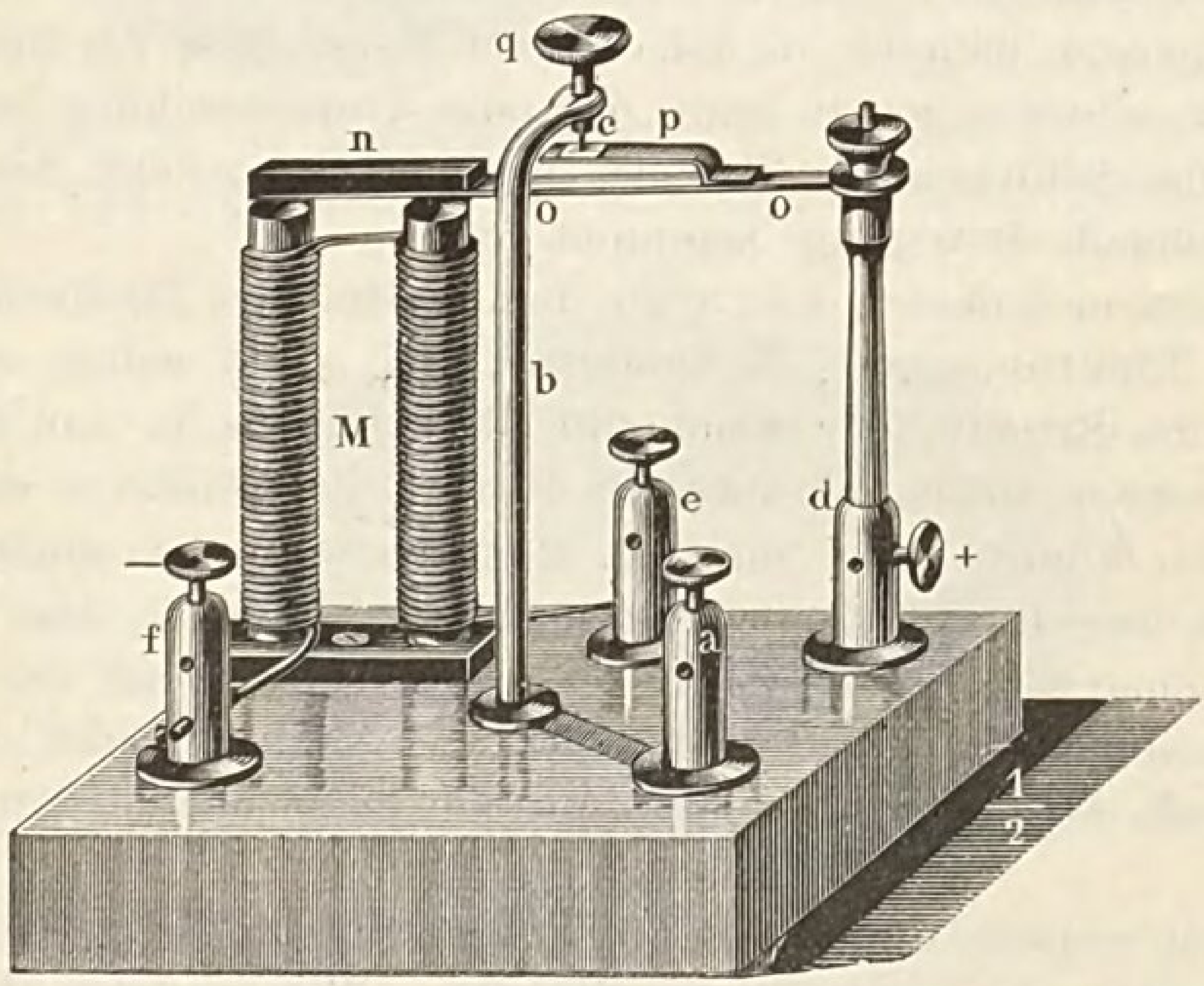
Eine zweite Hauptform des Rheotoms ist der von De la Rive in Genf, und unabhängig davon von Wagner in Frankfurt a. M. erfundene magnetische Hammer, bei welchem die Unterbrechung mittelst eines Elektromagnets durch den Hauptstrom selbst bewirkt wird. Ursprünglich war der magnetische Hammer mit dem Inductionsapparate zu einem untrennbaren Ganzen vereinigt worden, wie wir dies bei einem später zu beschreibenden Apparate sehen werden; der magnetische Hammer kann aber auch als eine ganz selbstständige Unterbrechungsvorrichtung construirt werden, so dass man ihn von dem einen Apparate wegnehmen und mit einem anderen verbinden kann, wie dies auch mit dem Unterbrechungsrade der Fall ist. Fig. 735 stellt einen solchen, einen selbstständigen Apparat bildenden magnetischen Hammer dar, und zwar mit jenen Verbesserungen, welche Poggendorff daran angebracht hat.

Der eine Poldraht des Rheomotors, etwa der positive, wird in das Messingsäulchen *a*, der andere in *f* eingeschraubt, während das eine Drahtende der Hauptspirale des Inductionsapparates bei *d*, das andere bei *e* eingeschraubt wird. Der Strom geht nun von *a* durch einen in das Holz eingelassenen Messingstreifen zur Messingsäule *b*, dann durch die

Platinspitze *c* auf ein Platinplättchen, welches auf die Messingfeder *p* aufgelöthet ist, und dann herab bis *d*, um in die Hauptspirale überzugehen. Aus der Hauptspirale gelangt dann der Strom über das Säulchen *e* in die Windungen des Elektromagnets *M* und aus diesen zum Säulchen *f*, in welches der andere Pol des elektromotorischen Bechers eingeschraubt ist.

Sobald der Strom die Windungen des Elektromagnets *M* durchläuft, wird dessen Eisenkern magnetisch, so dass er den eisernen Anker *n* anzieht, welcher auf dem einen Ende der messingenen Feder *o* befestigt ist; durch das Niederziehen des Ankers *n* wird auch *p* mit seinem Platinplättchen etwas niedergezogen und dadurch die Berührung zwischen diesem Platinplättchen und der Platinspitze *c* aufgehoben, was dann auch

Fig. 735.



eine Unterbrechung des Stromes in der Hauptspirale und in den Windungen des Elektromagnets *M* zur Folge hat.

Mit der Unterbrechung des Stromes verliert auch der Elektromagnet *M* seinen Magnetismus, und die Kraft der Feder *o* zieht dann sogleich den Anker *n* wieder in die Höhe, wodurch dann zugleich auch die metallische Berührung bei *c* wieder hergestellt wird und das eben beschriebene Spiel von Neuem beginnt.

Die Unterbrechungen des Stromes folgen sich hier mit solcher Schnelligkeit, dass man die einzeluen Vibrationen der Feder nicht wahrnehmen kann, dass man dagegen ein continuirliches Summen hört, während man an der Spitze bei *c* ein glänzendes, continuirlich erscheinendes Fünkchen beobachtet.

Die Platinspitze *c* ist am unteren Ende einer Schraube angebracht, durch deren Drehung man den Abstand des Ankers *n* von den Polen des Elektromagnets reguliren kann, so dass man es in der Gewalt hat, das

Spiel der Unterbrechungen nach Belieben schneller oder langsamer zu machen.

Ursprünglich wurde das Platinplättchen, auf welches die Platinspitze *c* zu stehen kommt, unmittelbar auf der Feder *o* angebracht, was zur Folge hatte, dass in dem Moment, in welchem der Anker *n* niederzugehen begann, auch sogleich die Unterbrechung des Stromes stattfand, dass also während der Oscillationen des Hammers der Strom nur momentan geschlossen blieb, während er dagegen längere Zeit unterbrochen war. — Nun aber ist es für den Effect der Inductionsapparate weit vortheilhafter, dass bei gleicher Oscillationsgeschwindigkeit des Hammers der Strom längere Zeit geschlossen bleibe und nur momentan unterbrochen werde. Poggendorff hat dies durch die zweite Feder *p* erreicht, welche so justirt ist, dass sie die Platinplatte noch mit einiger Federkraft gegen die Platinspitze *c* andrückt, wenn die Feder *o* in ihrer Gleichgewichtslage sich befindet; es hat dies zur Folge, dass der Anker *n* schon eine Strecke abwärts gehen kann, ehe eine Unterbrechung bei *c* erfolgt, und dass das Schliessen des Stromes schon wieder erfolgt, wenn *n* kaum seine aufgehende Bewegung begonnen hat.

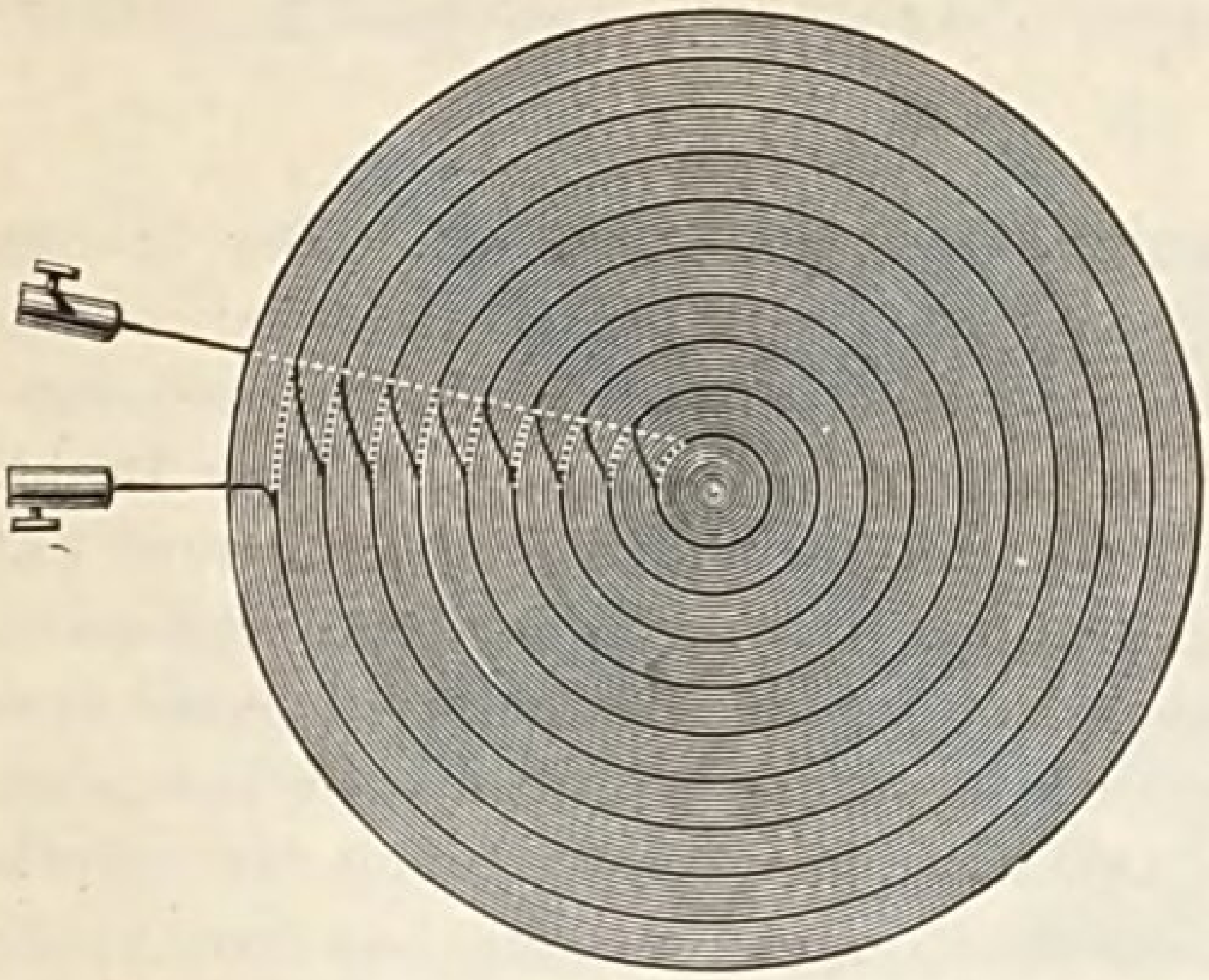
Der eiserne Anker *n* darf nicht in unmittelbare Berührung mit den Polen des Elektromagnets *M* kommen, weil sonst selbst nach Unterbrechung des Stromes der remanente Magnetismus in den Eisenkernen zu stark werden würde, als dass die Feder *o* den Anker *n* wieder in die Höhe ziehen könnte. Bei unserem Apparat wird dies einfach dadurch verhindert, dass die Messingfeder *o* noch so weit reicht, dass sie die Pole des Elektromagnets bedeckt, und dass der Anker *n* auf das freie Ende dieses Messingstreifens aufgesetzt ist, so dass sich stets ein Streifen Messingblech zwischen demselben und den Polen des Elektromagnets *M* befindet.

An den neueren Inductionsapparaten werden meistens Quecksilber-Unterbrecher in Anwendung gebracht. Wir werden dieselben im Zusammenhang mit jenen Apparaten beschreiben.

226 **Inductionsströme durch Entladungen statischer Elektricität.** Auch der Entladungsstrom der Leydener Flasche bringt, wie Masson gezeigt hat, einen Inductionsstrom in einem benachbarten Drahte hervor, wie man dies am besten mit den von Riess construirten ebenen Inductionsspiralen zeigen kann. In einem dicken Brett, welches sich nicht verzieht, sind concentrische Ringe eingeschnitten, Fig. 736, und durch gekrümmte Einschnitte zu einer spiralförmigen Figur vereinigt. In diese spiralförmige Rinne wird dann ein Kupferdraht eingelassen und durch Pech gehörig isolirt befestigt. Auf einem zweiten Brette ist in ganz gleicher Weise ein Kupferdraht so befestigt, dass, wenn man die mit den Windungen versehenen Seiten einander zukehrt, die Windungen des einen Brettes denen des anderen genau parallel sind.

Fig. 737 zeigt, wie man zwei solche Scheiben am bequemsten zusammenstellt. Auf die horizontale Oberfläche der unteren wird zunächst eine Glasplatte und auf diese dann die zweite Scheibe in der angegebenen Weise aufgelegt. Wenn man in die Klemmschrauben der oberen Scheibe Drähte einschraubt und deren Enden bis auf 1 oder 2 mm nähert, so springt durch diesen Zwischenraum ein Funken über, wenn man den Entladungsschlag einer Leydener Flasche durch die Windungen der unteren hindurchsendet.

Fig. 736.



Wenn man in die Klemmschrauben der oberen Scheibe Handgriffe von der Fig. 733 dargestellten Art einsetzt und diese mit befeuchteten

Fig. 737.

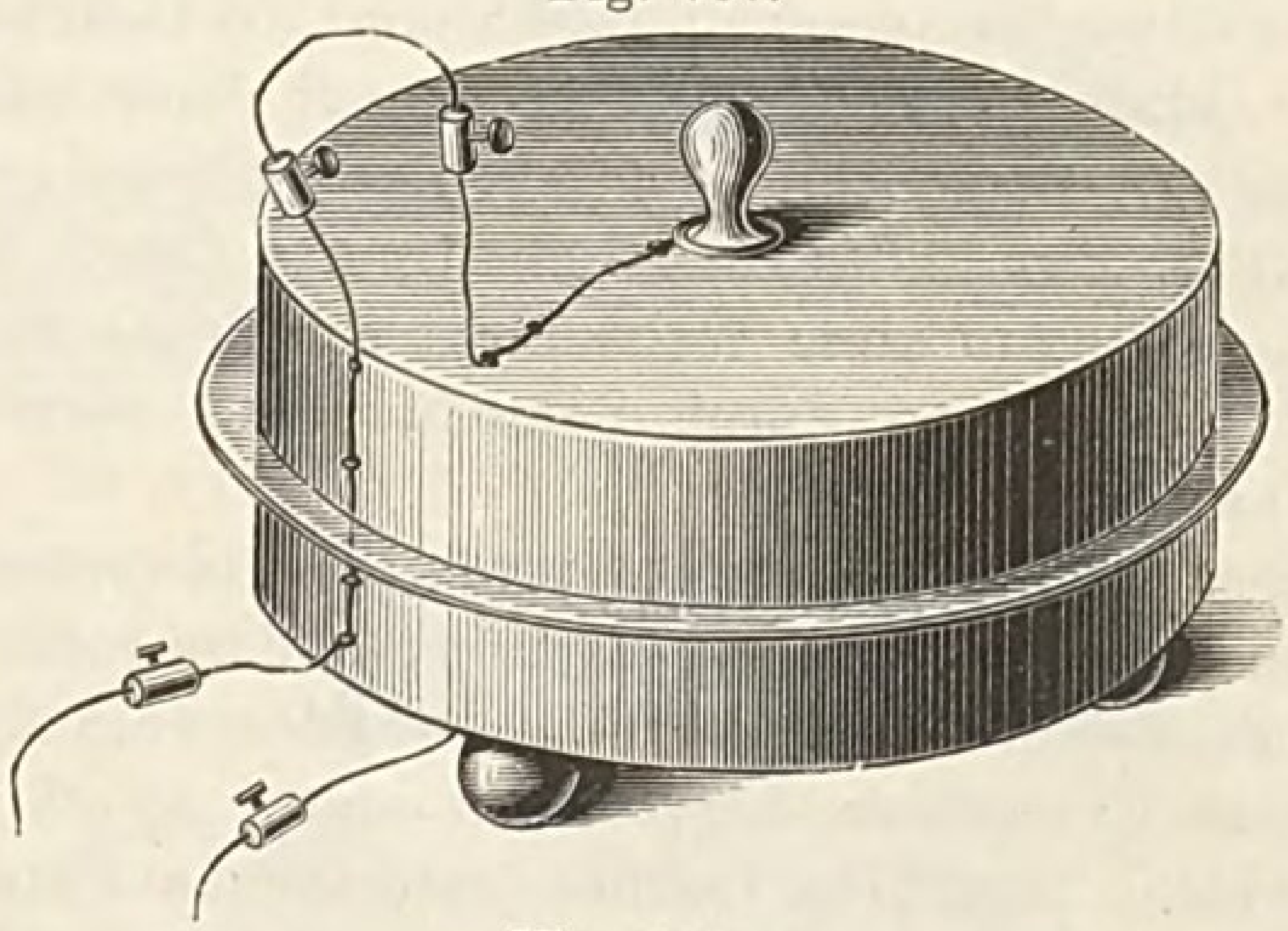
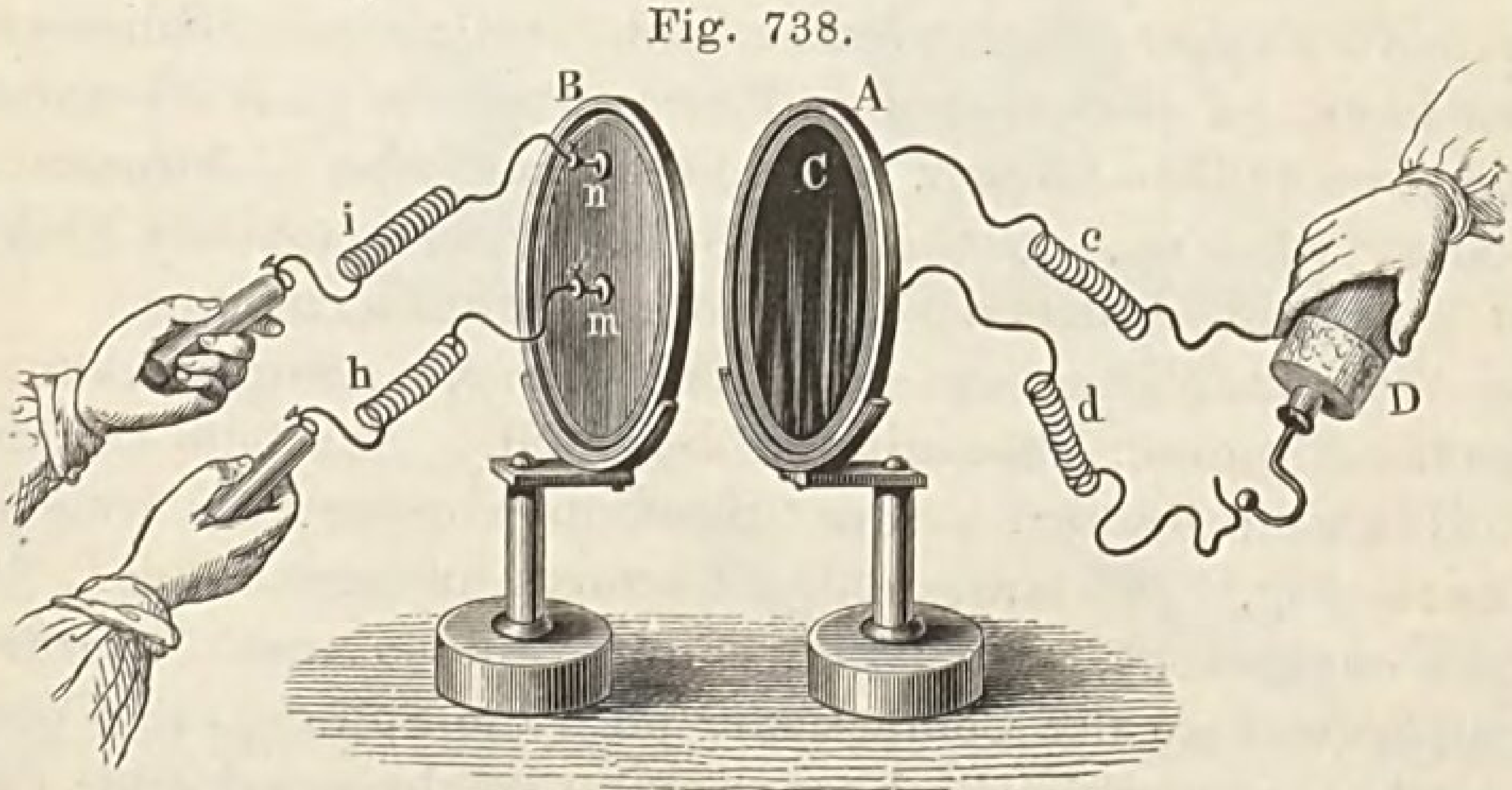


Fig. 738.



Händen anfasst, so erhält man einen Schlag, wenn eine Leydener Flasche durch die Windungen der anderen Scheibe entladen wird. Dieser Schlag

ist aber sehr schwach, weshalb nicht mehr als eine Person in den Schliessungsbogen der Inductionsspirale eingeschaltet sein darf.

Um den Abstand der beiden Scheiben nach Belieben ändern zu können, kann man sie auch vertical aufstellen, wie dies Fig. 738 erläutert.

227 **Die Selbstinduction und der Extrastrom.** Der in den Windungen einer Drahtspule fliessende primäre Strom wirkt bei seinem Entstehen und Aufhören, sowie überhaupt bei seinen Stromstärkeschwankungen nicht allein auf einen daneben aufgewickelten secundären Draht, sondern jede Windung des primären Drahtes wirkt auch inducirend auf die Nachbarwindungen desselben Drahtes. Der im Moment des Schliessens zu Stande kommende entgegengesetzte Inductionsstrom wird daher dem directen im Anfange entgegen wirken, so dass er seine volle Intensität nicht augenblicklich erreicht. Der im Moment der Oeffnung der Spirale zu Stande kommende gleich gerichtete Inductionsstrom hat genügende elektromotorische Kraft, um die Luftschichte zwischen den Enden an der Oeffnungsstelle unter Funkenbildung zu durchbrechen. Wird zwischen diesen Enden eine Nebenschliessung von grossem Widerstande, z. B. der menschliche Körper, eingeschaltet, so nimmt der Oeffnungsinductionsstrom den Weg durch diesen Leiter und ertheilt damit dem Körper den Oeffnungsschlag. Beim Schliessen geht natürlich nur ein sehr kleiner, meist unmerklicher Zweig des Inductionsstromes durch den schlechten Leiter, daher derselbe auf diese Weise nicht zur Beobachtung gelangt.

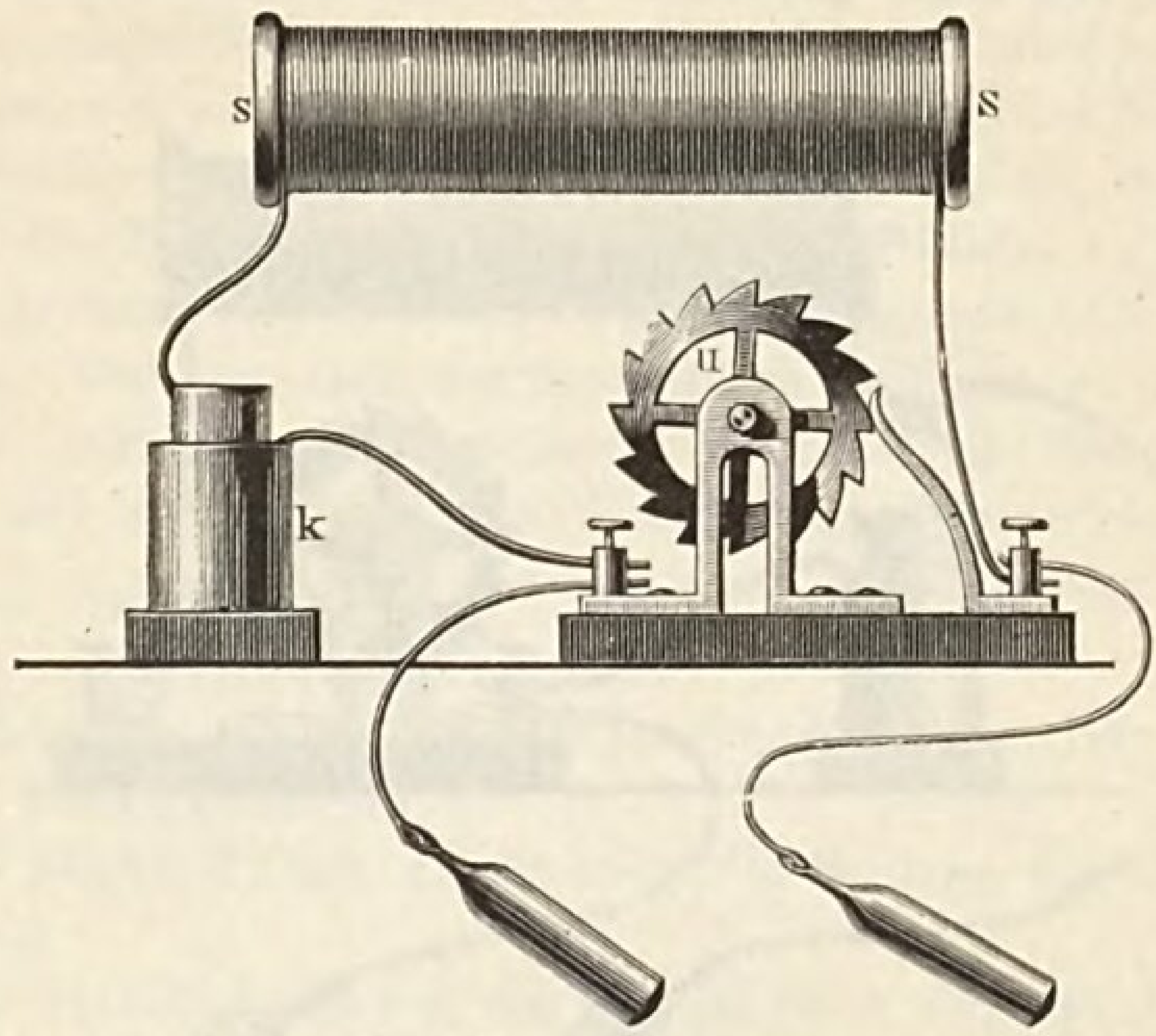
Faraday nannte den durch Selbstinduction enstandenen Strom den Extrastrom.

Da man sich jeden Draht aus mehreren parallel verlaufenden Metallfäden bestehend denken kann, so begreift man, dass jeder Strom, indem er mit einem Bruchtheile einen jeden dieser Fäden durchfliesst, in jedem Nebenfaden einen Extrastrom hervorrufen muss, so oft er geschlossen und geöffnet wird. Der beim Oeffnen entstehende Extrastrom ist es welcher den Funken giebt, welcher beim vorsichtigen Schliessen nicht entstehen kann, da der zugehörige Extrastrom erst nach Berührung der Drahtenden zu Stande kommt. Nur bei sehr grosser elektromotorischer Kraft kann, wie das auch bei den Strömen der statischen Elektricität der Fall ist, beim Schliessen ein sichtbarer Funke entstehen.

Die Art und Weise, wie man den Versuch anordnen kann, ist in beistehenden Figuren schematisch dargestellt. S ist die Drahtspirale, k der Volta'sche Becher, u der Stromunterbrecher, für welchen man auch das in Fig. 735 dargestellte Rheotom anwenden kann. Sind die Handgriffe angebracht, wie in Fig. 739, so bilden nach Unterbrechung des Hauptstromes an der Contactfeder noch die Spirale, der Volta'sche Becher und der menschliche Körper eine geschlossene Kette; der beim Verschwinden des Hauptstromes in der Spirale sich bildende Extrastrom kann also durch den Körper hindurchgehen. Dasselbe ist der Fall bei

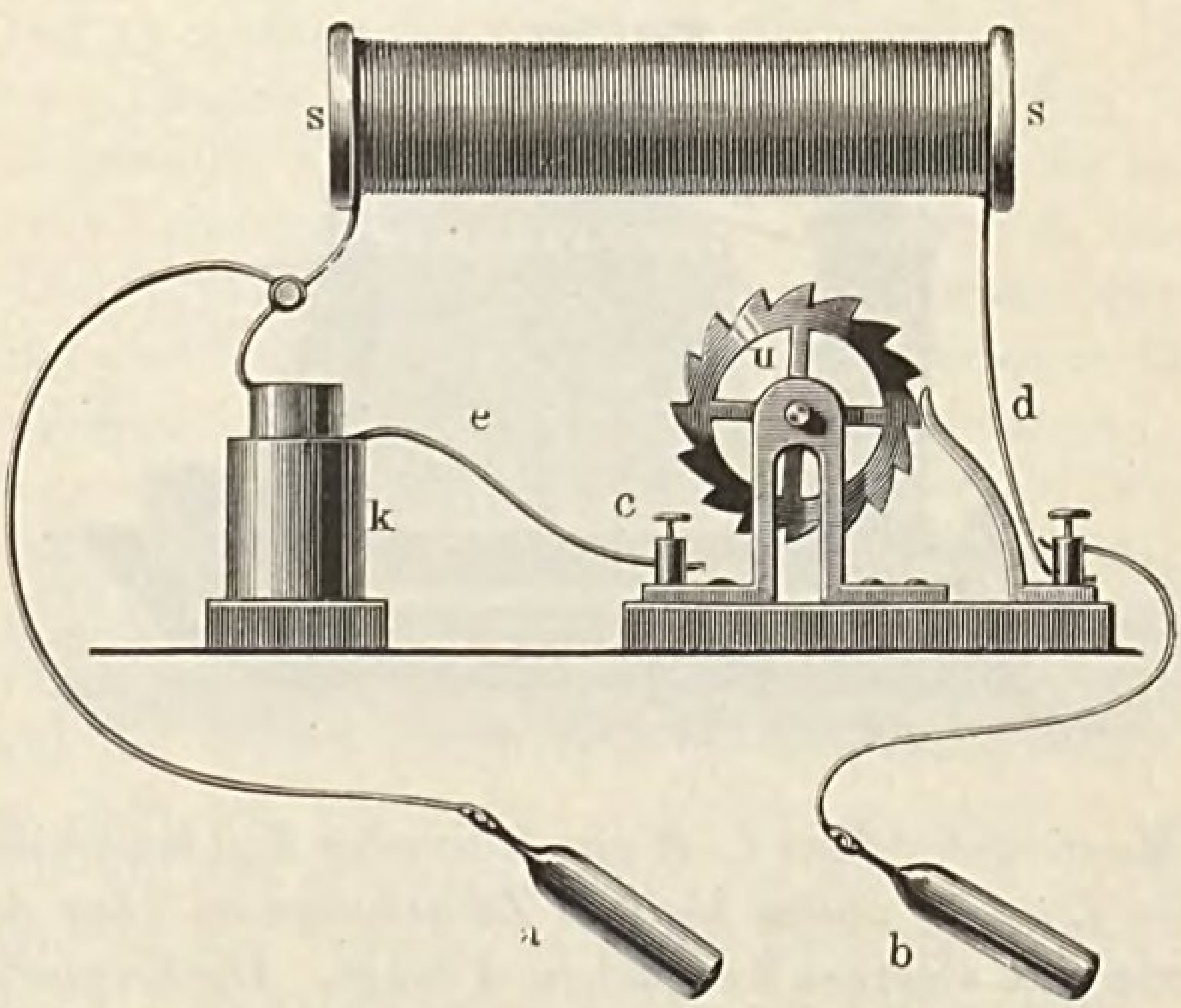
der in Fig. 740 dargestellten Anordnung; hier ist nach Unterbrechung des Hauptstromes die Spirale allein durch den Körper geschlossen, welcher den Schlag erhält; der Volta'sche Becher ist hier ausgeschaltet. Bei der Anordnung Fig. 741 (a. f. S.) endlich erhält man keinen Schlag,

Fig. 739.



weil nach Unterbrechung des Hauptstromes nur der Volta'sche Becher noch durch den Körper geschlossen, die den Extrastrom erzeugende Spirale aber ausgeschaltet ist.

Fig. 740.

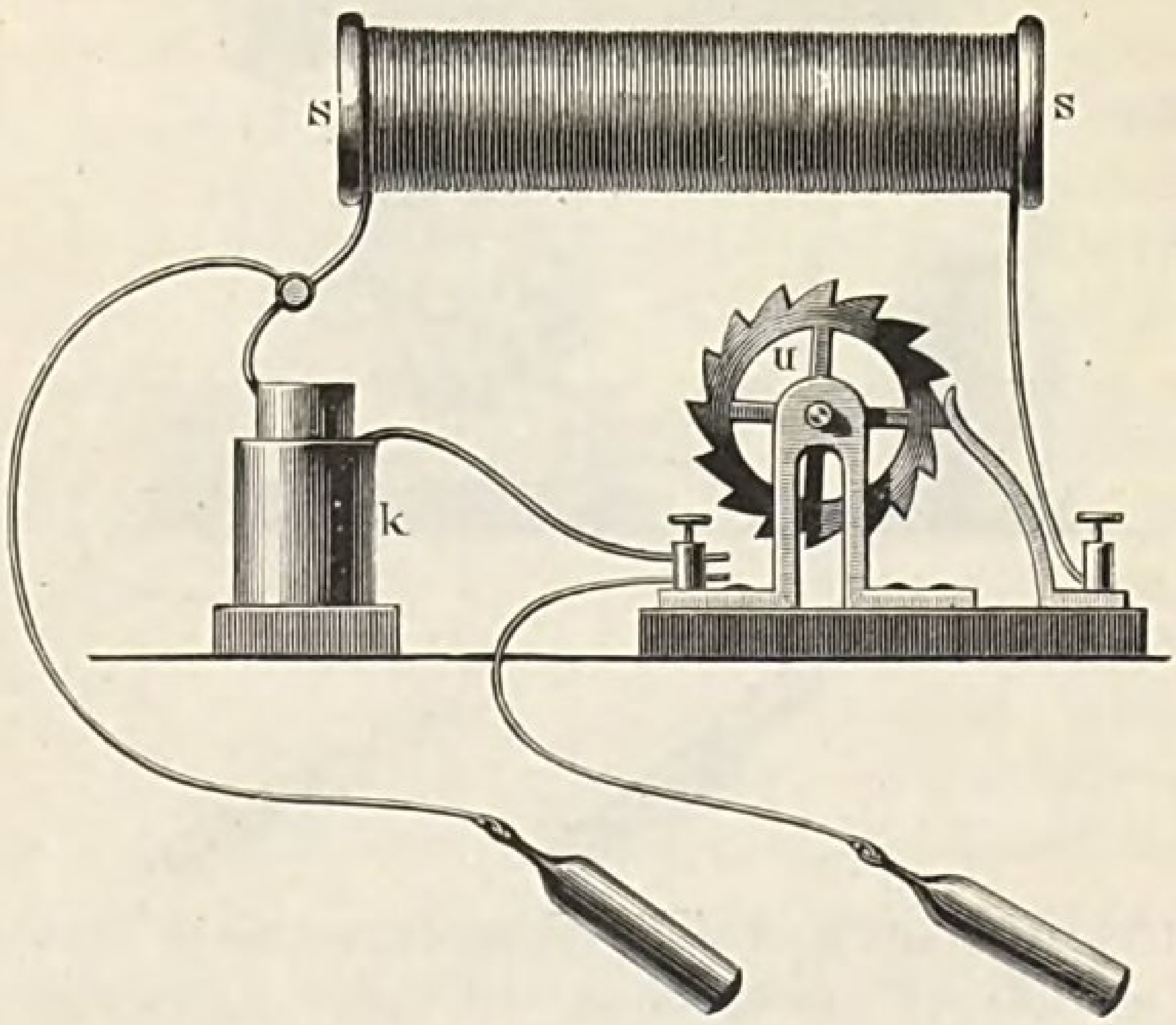


Um die in Fig. 739 dargestellte Combination leicht herstellen zu können, sind die Messingsäulchen *d* und *f* des Unterbrechungsrades Fig. 734 so eingerichtet, dass man in jedes derselben zwei Zuleitungsdrähte einschrauben kann.

Fig. 742 stellt eine Extrastromspirale dar, welche mit dem **elektromagnetischen Hammer** zu einem System verbunden ist, und welche sich vorzugsweise eignet, um kräftige physiologische Wirkungen hervorzubringen.

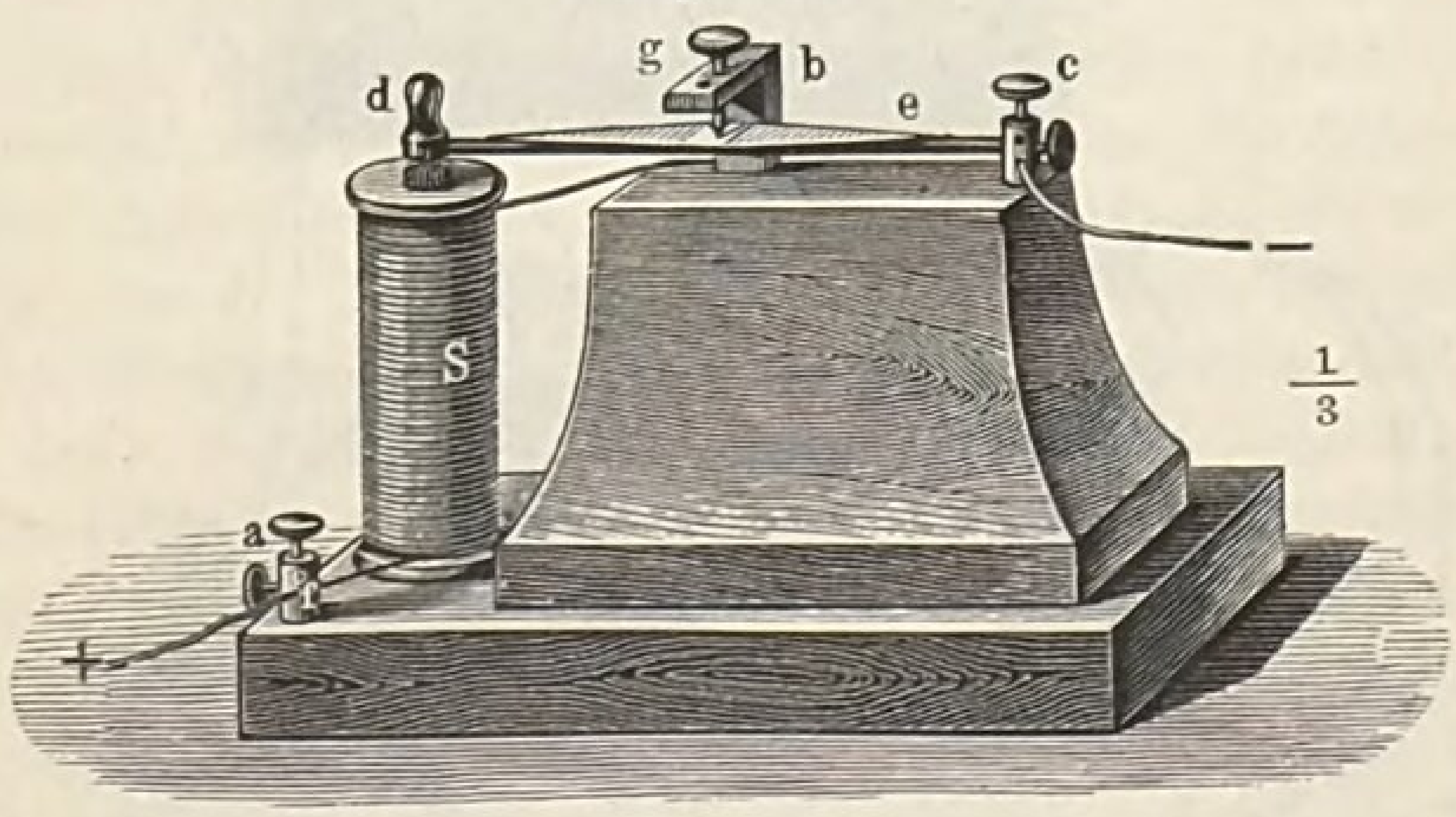
S ist die Spirale von dünnem, übersponnenem Kupferdraht, welcher auf eine Hülse von Holz gewickelt ist. Die beiden Drahtenden dieser

Fig. 741.



Spirale führen zu den Messingständern *a* und *b*. Im Inneren der Holzhülse befindet sich ein Bündel von Eisendrähten.

Fig. 742.



In dem Messingsäulchen *c* ist ein federnder Kupferstreifen befestigt, dessen anderes Ende in einem kleinen Zwischenraum über dem erwähnten Drahtbündel ein eisernes Knöpfchen *d* trägt. Die Kupferfeder drückt ungefähr in der Mitte ihrer Länge schwach gegen eine von oben herabkommende Platinspitze an, welche sich am unteren Ende einer in dem Ständer *b* angebrachten Schraube befindet. Da, wo die Kupferfeder mit der Spitze in Berührung kommt, ist ein kleines Platinplättchen aufgesetzt.

Der eine Pol eines Volta'schen Elementes wird nun bei *a*, der andere bei *c* eingeschraubt. Der bei *a* eintretende Strom durchläuft die Spirale *S*, gelangt aus derselben zum Ständer *b*, von welchem er durch die erwähnte Platinspitze auf die Kupferfeder übergeht, um von dieser nach *c* und dem anderen Pole des Elektromotors geführt zu werden.

Dieser Strom macht das Eisendrahtbündel, welches sich in der Spirale S befindet, magnetisch, der eiserne Knopf bei *d* wird niedergezogen und dadurch jenes Spiel der raschen Unterbrechung und Wiederherstellung des Stromes hervorgebracht, welches wir bereits oben kennen lernten.

Bei jeder Unterbrechung des Hauptstromes bildet sich nun in der Spirale *S* der Extrastrom, sobald eine entsprechende Nebenschliessung vorhanden ist. Befindet sich der menschliche Körper in dieser Nebenschliessung, so erhält er die bekannten Schläge; die Einschaltung des Körpers kann nun auf verschiedene Weise ausgeführt werden.

1. Die eine Handhabe ist bei *b*, die andere ist bei *c* eingesetzt. Es entspricht dies der Anordnung Fig. 739.

2. Der Anordnung Fig. 740 entsprechend, ist eine Handhabe bei *a*, die andere bei *b* eingeschraubt.

In diesen beiden Fällen erhält man die Schläge des Extrastromes, nicht aber, wenn

3. die eine Handhabe bei *a*, die andere bei *c* eingesetzt ist, was der Anordnung Fig. 741 entspricht.

Die Existenz des dem Hauptstrom entgegengesetzten Extrastromes, welcher beim Schliessen der Kette entsteht, hat zuerst Dove auf experimentellem Wege nachgewiesen. Am unzweideutigsten hat Edlund*) den Extrastrom auch zu Anfang des primären nachgewiesen. Der Apparat, den er zu diesem Zwecke anwendete, hat folgende in Fig. 743 (a. f. S.) schematisch dargestellte Einrichtung. *A* ist eine galvanische Säule, von deren Polen zwei Leitungsdrähte nach *b* und *c* führen; *M* ist ein Spiegelgalvanometer nach Wiedemann mit zwei gleichen Drahtspulen. In unserer Figur stellt *fgnih* das erste, *pme* das zweite Gewinde dar; *p* und *e* sind die Schraubklemmen, in welchen der Draht des letzteren, *f* und *h* sind die Schraubklemmen, in welchen der Draht des ersteren Gewindes endigt. Von *b* geht eine Drahtleitung nach *p* und nach *h*, während *c* mit *e* und mit *f* leitend verbunden ist. Die Verbindung ist, wie man leicht übersieht, von der Art, dass der Strom, welchen die Batterie *A* liefert, sich bei *c* theilt und die beiden Drahtlagen in entgegengesetzter Richtung durchläuft, so dass bei gehöriger Abgleichung keine Ablenkung der Magnetnadel durch den primären Strom der Kette *A* entstehen kann. In unserer Figur ist der Verlauf des durch die Säule *A* direct erzeugten Stromes durch die ungefiederten Pfeile ⟶ dargestellt.

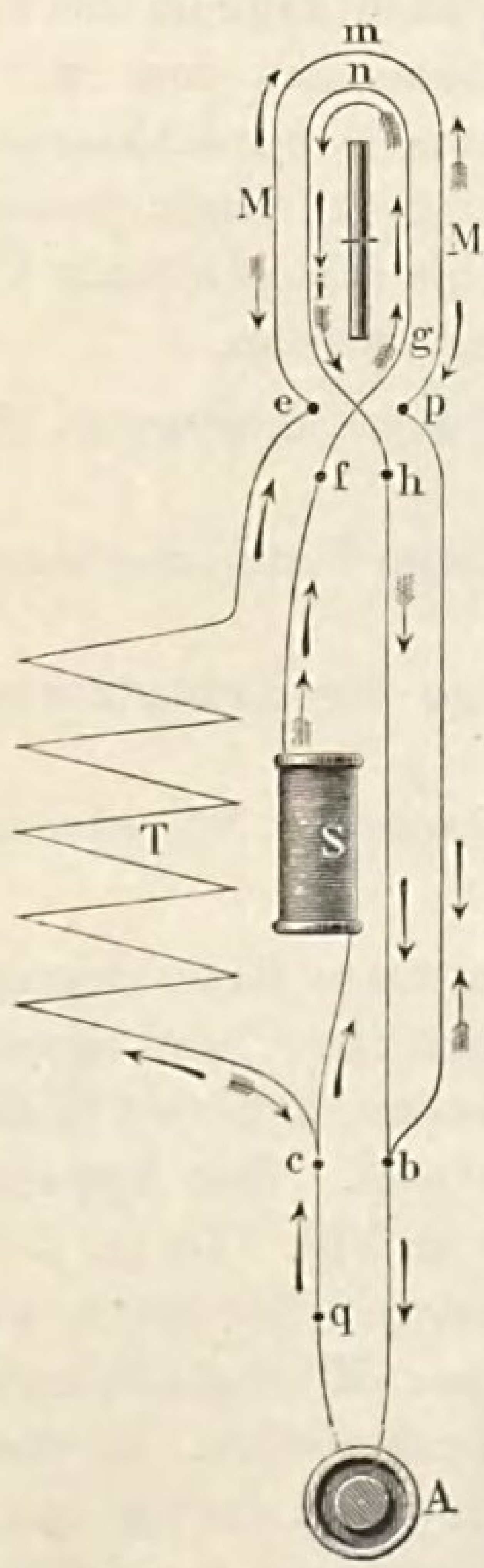
Bei *q* war eine einfache Vorrichtung getroffen, durch welche die

*) Poggendorff's Annalen, Bd. LXXVII, S. 161.

Kette bequem und gleichförmig geöffnet und geschlossen werden konnte. Das Spiegelgalvanometer wurde mittelst Fernrohres beobachtet.

Wenn nun bei S eine Drahtrolle in den Kreis der ersten Multiplicatorlage eingeschaltet wird, so muss, wenn das Gleichgewicht am Galvanometer nicht gestört werden soll, in die Zuleitung zur Drahtlage bmc, etwa zwischen c und e, ein entsprechender Widerstand eingeschaltet werden; um aber zu verhindern, dass in dieser zwischen c und e angebrachten Einschaltung ein Inductionsstrom entstände, der dem in S erzeugten, welcher untersucht werden soll, entgegen wirken könnte, so wurde dieser Einschaltungsdraht T über zwei Glasstangen gewunden, welche 3 m weit von einander abstanden, so dass also der Draht zwischen den Glasstangen geradlinig ausgespannt war.

Fig. 743.



Wurde nun, nachdem die Widerstände so abgeglichen waren, dass die beiden Drahtgewinde am Galvanometer sich das Gleichgewicht hielten, der Strom bei q unterbrochen, so bildete sich in der Spirale S ein Extrastrom, welcher in der Richtung circulirte, wie es die gefiederten Pfeile ⇛→ andeuten, welcher also, die beiden Drahtlagen in gleicher Richtung durchlaufend, den Magnet ablenken musste.

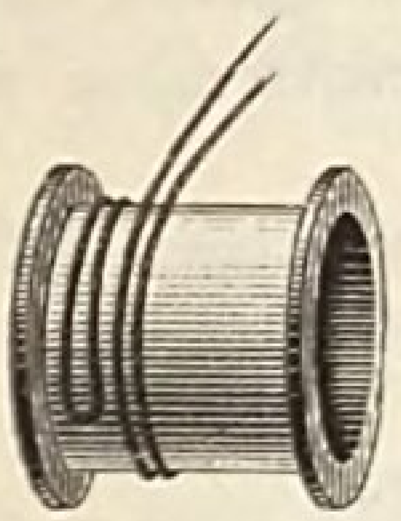
Wird die Kette wieder geschlossen, so muss das nämliche Verhältniss stattfinden, d. h. es wird auch jetzt der bei der Schliessung in S inducirte Extrastrom die beiden Drahtlagen in gleicher (den gefiederten Pfeilen entgegengesetzter) Richtung durchlaufen, es findet gegen den vorigen Fall nur der Unterschied statt, dass ein Theil des Indnctionsstromes von b durch die Säule A nach c läuft.

Bei Anstellung der Versuche ergab sich nun, dass der Ausschlag des Galvanometers beim Schliessen der Kette gleich und entgegengesetzt war demjenigen, welcher beim Oeffnen entsteht, und daraus ergiebt sich, dass, *wenn im Schliessungsbogen einer galvanischen Kette eine Drahtspirale eingeschaltet ist, beim Schliessen der Kette sowohl wie beim Oeffnen derselben durch die Einwirkung jedes Stromtheils auf die benachbarten Windungen Ströme inducirt werden, welche unter sonst gleichen Umständen in beiden Fällen gleiche Stärke haben.* Diese gleichen Umstände sind jedoch nicht immer gegeben, worauf wir weiter unten zurückkommen werden.

Das Entstehen der Extraströme in Stromspiralen bringt oft z. B. bei Widerstandsapparaten Störungen mit sich. Um diese zu vermeiden,

oder doch zu vermindern, giebt es zwei Mittel. Entweder man spannt den Draht frei durch die Luft auf, so dass kein Theil derselben dem anderen nahe liegt, oder man spannt oder wickelt ihn bifilar auf, so dass jedem Drahtstücke ein gleich langes in entgegengesetzter Weise gerichtetes zur Seite liegt. Zu diesem Zwecke knickt man den isolirten Draht in der Mitte, legt ihn zu einem doppelten Drahte zusammen und wickelt ihn mit der Mitte anfangend so auf, das stets beide Drähte neben einander zu liegen kommen. Die Fig. 744 stellt dies dar. Eine solche Drahtspule heisst man dann bifilar oder inductionsfrei gewickelt. In Wirklichkeit sind, wie H. v. Helmholtz zuerst erkannt und neuerdings H. F. Weber*) nachgewiesen hat, auch solche Drahtspulen nicht ganz inductionsfrei, wenn auch ihre Selbstinduction sehr viel kleiner ist, als die gewöhnlicher unifilar gewickelter Spulen.

Fig. 744.



Umstände, welche die Wirksamkeit einer Inductionsspirale schwächen oder erhöhen. 228 Wir haben bereits im vorigen Paragraphen erklärt, warum in Folge des Vorhandenseins von weichen Eisenmassen im Inneren der Inductionsspirale die Stärke des Inductionsstroms bei gleicher Intensität des primären Stromes grösser ausfallen muss. Es kommt eben zu der inducirenden Wirkung des Schliessens und Oeffnens des primären Stromes auch noch die inducirende Wirkung des Entstehens und Vergehens eines Elektromagneten. Dabei ist es aber, wie Sturgeon zuerst beobachtet hat, durchaus nicht gleichgültig, ob diese Eisenmassen aus einem massiven Stabe oder aus einem Bündel von gegenseitig isolirten dünnen Eisenstäbchen bestehen. Letztere sind bedeutend wirksamer. Dieser Umstand erklärt sich, wie Magnus gezeigt hat, einfach in folgender Weise. Es sei in Fig. 745 (a. f. S.) ein schematischer Querschnitt durch eine Inductionsrolle dargestellt. *a* sei die äussere Lage, welche aus vielen Windungen des dünnen Inductionsdrahtes besteht, dessen Enden in *i* und *i'* sind, *b* sei die innere Drahtlage, bestehend aus dem dicken Drahte für den primären Strom, dessen Enden + *p* und — *p* mit den Polen der Volta'schen Säule in Verbindung gebracht werden. *c* stelle die cylindrische Wandung der Spule vor, auf welche die Drahtwindungen gewickelt sind, *d* endlich sei der massive Eisenkern. Sowie nun der Strom durch die primären Drahtwindungen in der Richtung des Pfeils *b* geschlossen wird, entstehen nicht bloss in dem Inductionsdrahte *a*, sondern auch in der Eisenmasse Inductionsströme in der Richtung der Pfeile *a* und *d*. Ja auch in der Wandung der Spule *c*, falls dieselbe aus einem leitenden Materiale wäre, würden solche Ströme entstehen. Diese in *c* und *d* entstandenen Inductionsströme müssen in mehr-

*) Sitzungsber. der Berliner Akademie XXVIII, 1886.

facher Weise schwächend auf den Inductionsstrom in a wirken. Einmal induciren sie selbst in a im ersten Moment einen entgegengesetzten, dann einen gleichgerichteten Inductionsstrom, dann aber wirken sie auf den inneren Eisenkern zuerst im Sinne entgegengesetzter, dann erst gleicher Magnetisirung wie der primäre Strom, wodurch die volle Magnetisirung verlangsamt wird. Beim Oeffnen des primären Stromes entstehen dann wiederum in c und d Inductionsströme, welche das Verschwinden des Magnetismus verlangsamen.

Um diese nachtheilige Wirkung zu verhindern, muss man dafür sorgen, dass in c und d keine bemerkenswerthen Inductionsströme zu

Fig. 745.

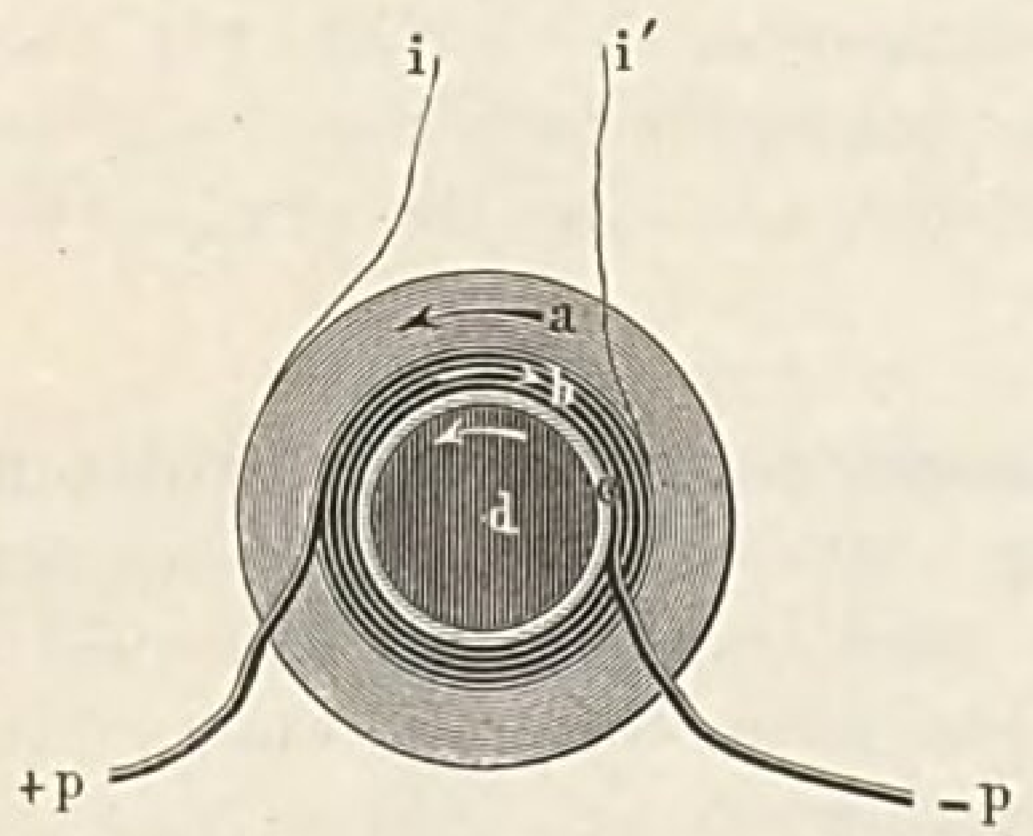
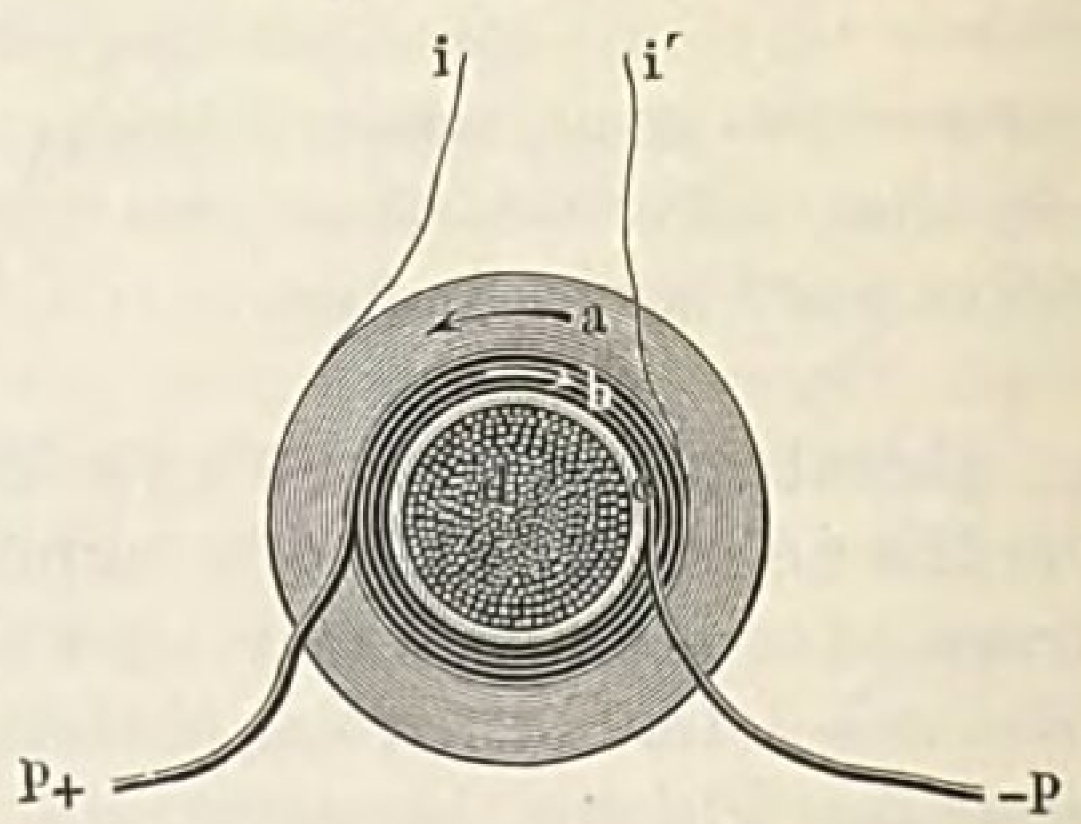


Fig. 746.



Stande kommen können, indem man ihnen keine ununterbrochene Leitung darbietet. Man ersetzt deshalb das massive Eisen durch ein Bündel gegen einander isolirter gefirnisster Drahtstäbchen (Fig. 746) und fertigt die Spulenwandung c aus einem nichtleitenden Stoffe (Holz, Hartgummi) oder man schlitzt den Cylinder c der Länge nach auf.

Statt der Drahtstäbe in d kann man auch wohl eine Lage parallel geschichteter von einander isolirter Eisenblechlamellen anwenden. Auch ausserhalb der äusseren Drahtwindungen muss man metallische Umhüllungen vermeiden. Das hier Gesagte gilt auch für solche Apparate, bei welchen der Extrastrom möglichst kräftig auftreten soll.

229 **Abhängigkeit der elektromotorischen Kraft des Inductionsstroms von der Windungszahl der Spirale; Princip der Transformatoren im Allgemeinen.** In der Fig. 747 stelle A einen primären Stromkreis vor; durch das Schliessen und Oeffnen desselben werde in dem secundären Stromkreis B eine elektromotorische Kraft e geweckt. Ist der Widerstand des Kreises $B = w$, so ist der Inductionsstrom von der Stärke $i = \frac{e}{w}$.

Nun denken wir uns den Draht des Kreises B der Länge nach gespalten, oder, was auf dasselbe hinauskommt, wir denken ihn ersetzt durch zwei von einander isolirte, aber knapp neben einander verlaufende

Stromkreise von halb so grossem Querschnitt, Fig. 748. Der uhter gleichen Umständen geweckte Inductionsstrom hat dann in jedem dieser Leiter die Intensität: $\frac{e}{2w} = \frac{i}{2}$. Ersetzen wir jetzt (Fig. 749) diese beiden Drähte durch zwei hinter einander geschaltete Windungen derselben Drahtsorte, so ist der Widerstand dieses Leiters $= 4w$, die in ihm wirksame elektromotorische Kraft $= 2e$, die Stromstärke $= \frac{2e}{4w} = \frac{i}{2}$.

Nehmen wir n hinter einander geschaltete Windungen eines Drahtes von $\frac{1}{n}$ Querschnitt, so wird die gesammte elektromotorische Kraft $= ne$, der Widerstand $= n^2 w$, die Stromstärke $= \frac{ne}{n^2 w} = \frac{e}{nw} = \frac{i}{n}$.

In allen diesen Fällen bleibt die Stromstärke aller parallelen Windungen zusammengenommen, sowie die Stromenergie dieselbe, da das

Fig. 747.

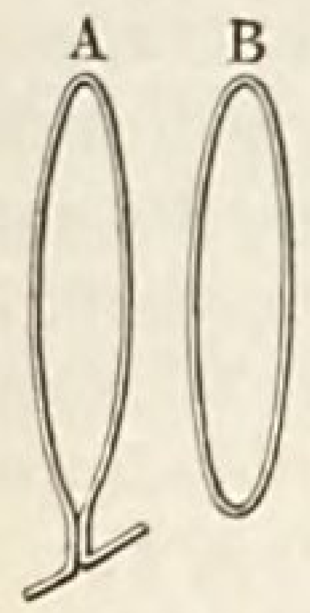


Fig. 748.

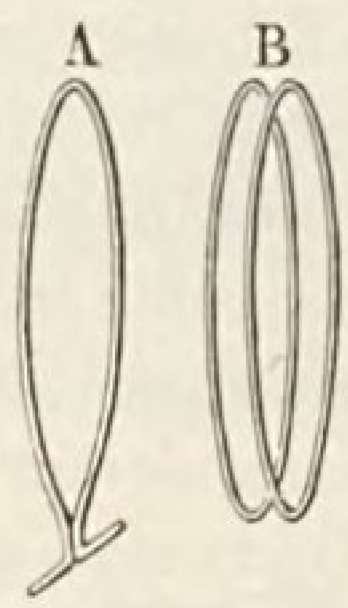
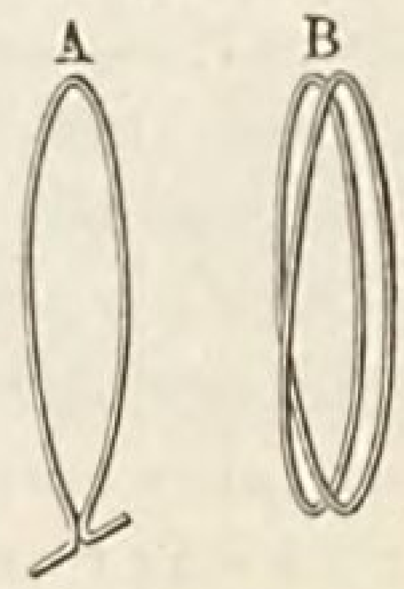


Fig. 749.



Product aus der elektromotorischen Kraft mit der Stromstärke constant $= ei$ bleibt.

Daraus folgt, dass auch der Arbeitsaufwand zur Erzeugung dieser verschiedenen Inductionsströme gleich gross bleiben wird. Wir können daher mit einem und demselben Stromkreise und unter gleicher Verminderung seiner Intensität Inductionsströme von beliebig gesteigerter elektromotorischer Kraft gewinnen, wobei aber ihre Stromintensität in demselben Verhältniss vermindert wird, in welchem die elektromotorische Kraft gesteigert wurde.

Machen wir dann die vielgewundene Spirale zur primären Stromleitung und die früher primäre zur secundären, so muss ein umgekehrtes Verhalten folgen, der Inductionsstrom wird dann auf Kosten der elektromotorischen Kraft an Stromstärke gewinnen.

Eine solche Doppelspule mit einem dickeren Draht von wenigen Windungen und einem dünnen Draht von vielen Windungen kann daher, je nachdem man den viel gewundenen oder den wenige Windungen bildenden Draht zur primären Leitung macht, in der anderen Leitung Inductionsströme liefern, die grössere Stromstärke aber geringere Spannung oder geringere Stromstärke mit grösserer Spannung besitzen. Solche Apparate können demnach als Transformatoren bezeichnet

werden; gewöhnlich werden jedoch nur die auf erstere Art angewendeten Apparate Transformatoren, die Apparate der letzteren Art Inductionsapparate oder Inductorien genannt.

Die Ströme der Inductionsapparate nehmen gewissermaassen eine Zwischenstellung zwischen den Strömen der statischen Elektricität und den galvanischen Strömen ein; sie übertreffen die Ströme der Reibungselektrisirmaschine und der Influenzmaschine bedeutend an Stromstärke, stehen ihnen aber an Spannung nach; sie übertreffen die Ströme der galvanischen Elemente an Spannung, stehen ihnen aber an Stromstärke nach. Sie eignen sich daher als Stromquelle besonders dort, wo sehr grosse Widerstände zu überwinden sind, wie bei Funkenexperimenten und bei physiologischen Versuchen. Doch haben wir es, wie oben gezeigt wurde, innerhalb gewisser praktischer Grenzen in der Hand, Stromstärke und Spannung auf gegenseitige Kosten zu modificiren.

230 **Ungleiche elektromotorische Kraft des Schliessungs- und des Oeffnungsinductionsstroms; Disjunctoren.** Der Inductionsstrom, welcher durch Schliessung des Hauptstroms entsteht, führt zwar eine gleiche Menge von Elektricität mit sich, wie der bei Oeffnung entstehende; trotzdem hat der letztere eine grössere elektromotorische Kraft als der erstere. Wir wollen zuerst zeigen, wie dies experimentell erwiesen wird, dann eine Erklärung hierfür geben. Dazu bedürfen wir aber eines Apparates, welcher gestattet, durch irgend einen Körper entweder nur die Oeffnungsschläge oder nur die Schliessungsschläge der Inductionsspirale hindurchgehen zu lassen. Solche Apparate sind namentlich von Dove, Masson und Buff construirt worden; nach Dove wollen wir dieselben als Disjunctoren bezeichnen. Fig. 750, 751 und 752 stellen Buff's Disjunctor, welcher wohl der bequemste und zweckmässigste sein dürfte, in $^1/_3$ der natürlichen Grösse dar.

Auf einer und derselben Umdrehungsaxe sitzen zwei ganz gleiche Messingräder, B und C, von denen das eine, nämlich B, durch eine Hülse von Ebenholz vor metallischer Berührung mit der Axe geschützt ist (Fig. 752), so also, dass die beiden Räder nicht in metallischer Verbindung stehen. Am Umfange dieser Räder sind Stücke von Buchsbaumholz so eingesetzt, dass dadurch die Mantelfläche in 12 gleiche Abtheilungen getheilt wird, welche abwechselnd aus Metall und aus Holz gebildet sind.

Auf dem Umfange des Rades B schleift die Metallfeder 2, auf C schleift die Feder 3, während auf der mit B zusammenhängenden Hülse A die Feder 1 und auf der mit C zusammenhängenden Hülse D die Feder 4 schleift.

Die Federn 1 und 2 sind durch Messingstreifen mit den Klemmschrauben a und a', b und b' in metallischer Verbindung; ebenso steht

die Metallfeder 3 in leitender Verbindung mit den Klemmschrauben c und c', 4 steht in leitender Verbindung mit d und d'.

Sind nun in a und b oder in a' und b' die Poldrähte eines Zinkkohlenbechers eingeschraubt, in dessen Schliessungsbogen die Hauptspirale eingeschaltet ist, während in c und d, oder in c' und d' Drähte eingeschaltet sind, welche zu den beiden Enden der Nebenspirale führen, so wird bei Umdrehungen der Axe durch das Rad B der Hauptstrom abwechselnd geschlossen und unterbrochen, während durch das Rad C

Fig. 750.

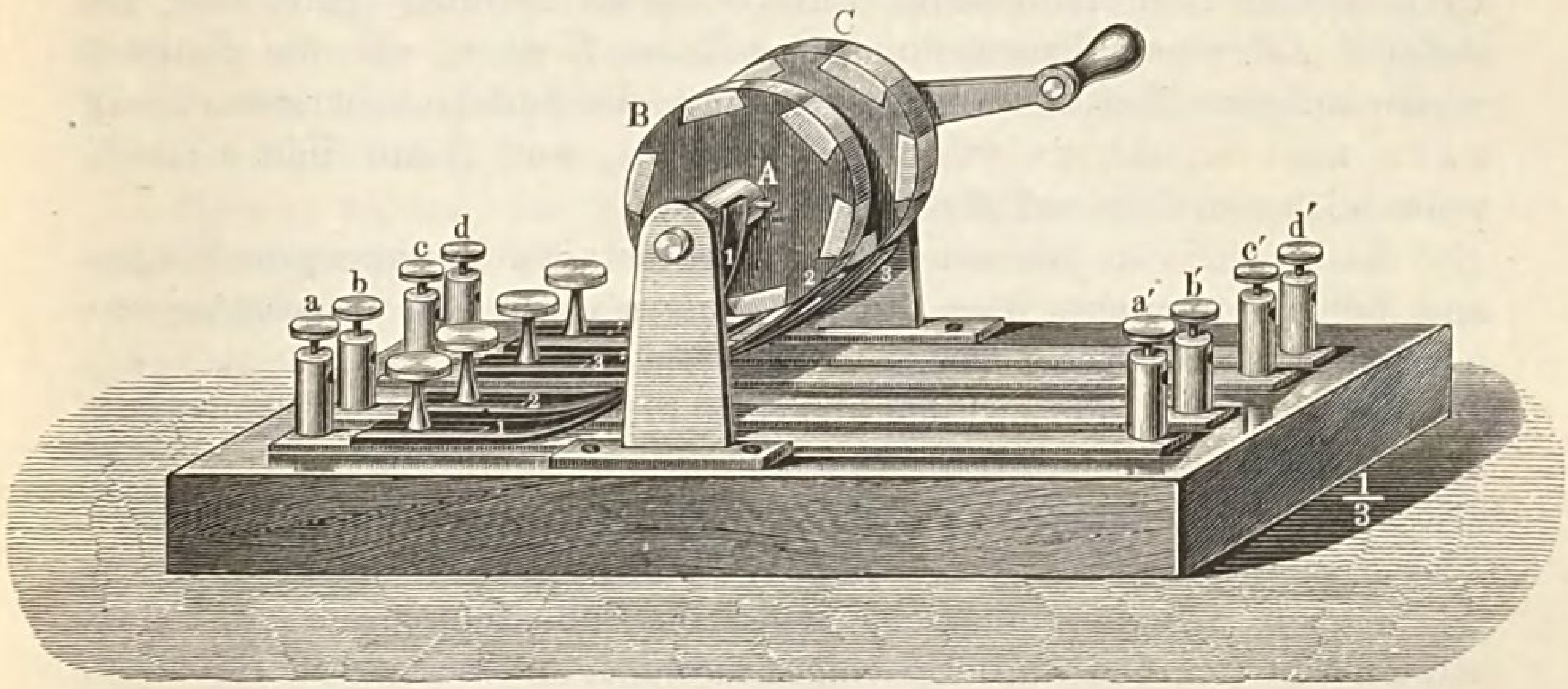


Fig. 751.

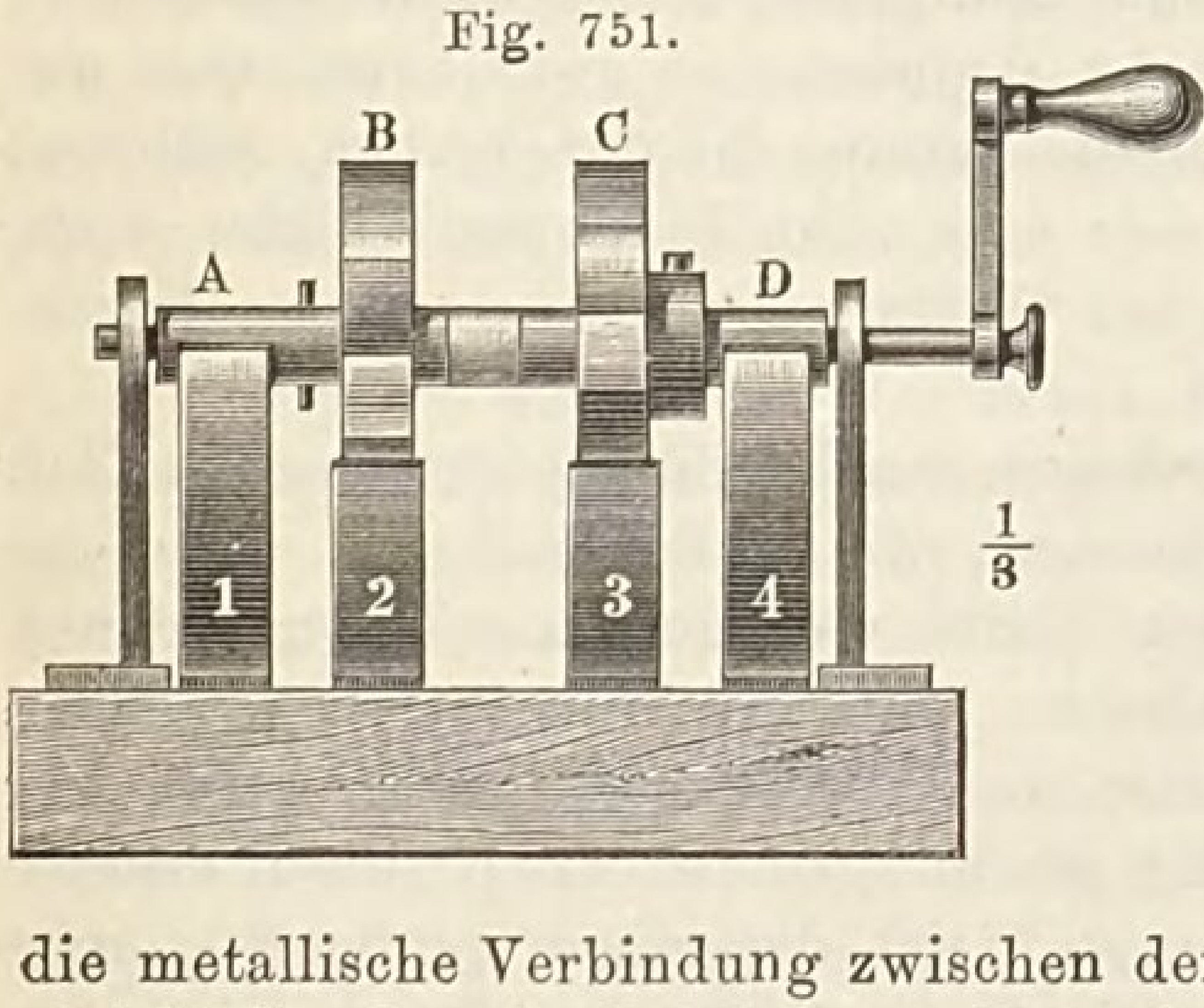
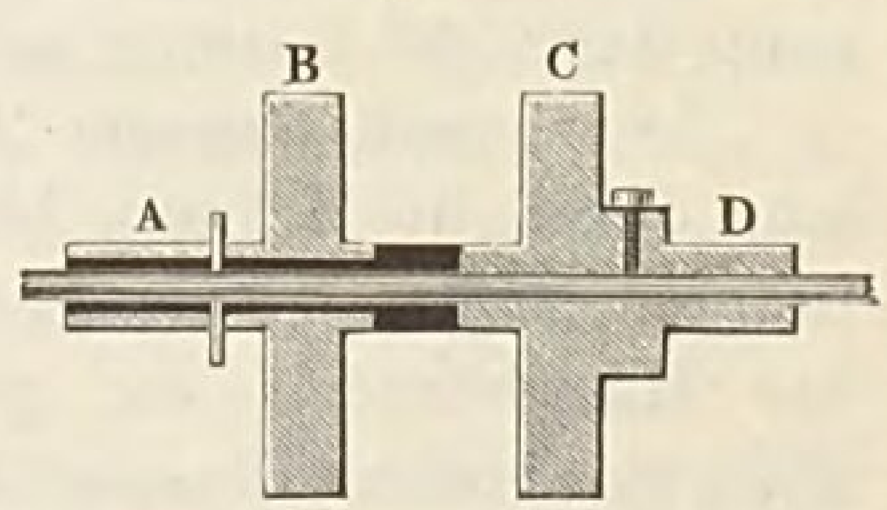


Fig. 752.



die metallische Verbindung zwischen den beiden Enden der Nebenspirale gleichfalls abwechselnd hergestellt und unterbrochen wird.

Nun aber sind die beiden Räder B und C so gegen einander gestellt, dass nicht etwa die Randabtheilungen des einen denen des anderen genau entsprechen, sondern so, dass das eine Rad gegen das andere um die Breite einer halben Randabtheilung verstellt ist, so also, dass, wenn man sich eine der Grenzlinien zwischen Holz und Messing auf der einen Mantelfläche bis zum anderen Rade verlängert denkt, diese Verlängerungslinie auf die Mitte einer Holz- oder einer Messingabtheilung trifft, wie man dies in Fig. 750 und in Fig. 751 sieht.

Dadurch kommt es nun, dass, wenn bei Umdrehung der Axe die Feder 2 eben eine Trennungsstelle zwischen Holz und Messing passirt, die Feder 3 auf der Mitte einer Holz- oder auf der Mitte einer Messingabtheilung steht. Nur im letzteren Falle kann der Inductionsstrom zu Stande kommen.

Wird z. B. die Axe so gedreht, dass der vordere Theil der Räder, Fig. 751, sich von oben nach unten bewegt, so geht die Feder 2 von Messing auf Holz über, der Hauptstrom wird also unterbrochen, während die Feder 3 auf einer Messingabtheilung steht; der Oeffnungsstrom kommt also zu Stande. Bei weiterer Drehung geht aber die Feder 3 auf eine Holzabtheilung des Rades *C* über, ehe die Feder 2 wieder auf eine Messingabtheilung kommt; der Schliessungsschlag kann also nicht zu Stande kommen, weil 3 auf Holz schleift, während 2 von Holz auf Messing übergeht.

Es ist leicht zu übersehen, dass man nur Schliessungsschläge, aber keine Trennungsschläge erhält, wenn man die Axe in entgegengesetzter Richtung dreht.

Schaltet man nun zwischen dem einen Drahtende der Nebenspirale und dem Rade *C* in passender Weise einen beliebigen Leiter ein, so wird also derselbe je nach der Umdrehungsrichtung nur von Schliessungs- oder nur von Oeffnungsschlägen durchströmt.

Ist nun in den Schliessungsbogen der Inductionsspirale ein Gefäss mit Kupfervitriollösung eingeschaltet, in welche zwei Platinplatten als Elektroden eintauchen, so erhält man einen Kupferniederschlag nur auf der einen Platinplatte, wenn der Disjunctor so gestellt ist, dass nur die Schliessungsströme durch die Lösung hindurchgehen, während sich ein Kupferniederschlag auf der anderen Platinplatte bildet, wenn die Stellung des Disjunctors nur den Oeffnungsströmen den Durchgang durch die Lösung gestattet.

Lässt man dagegen Schliessungs- und Oeffnungsströme eine Zeit lang durch die Lösung hindurchgehen, wie es der Fall ist, wenn die Inductionsspirale stets geschlossen bleibt und man zur Unterbrechung des Hauptstromes ein gewöhnliches Unterbrechungsrad oder einen Wagner'schen Hammer anwendet, so erhält man auf keiner der beiden Elektroden einen Kupferniederschlag. Die chemische Wirkung der Oeffnungsströme ist also gleich derjenigen der Schliessungsströme, und daraus folgt, dass die Quantität der Elektricität, welche bei einem Schliessungsschlag den inducirten Draht durchströmt, eben so gross ist, wie die dem Oeffnungsschlage entsprechende.

Ganz anders verhält es sich mit den physiologischen Wirkungen der Inductionsströme. Wenn man statt des Kupfervitriol-Voltameters den menschlichen Körper in den Schliessungsbogen der Inductionsspirale einschaltet, so erhält man sehr kräftige Schläge, wenn der Disjunctor so gestellt ist, dass er nur Oeffnungsschläge durch den

Körper hindurchgehen lässt, weit schwächere dagegen, wenn nur Schliessungsschläge durch denselben hindurchgehen.

Experimentirt man mit einer Inductionsspirale, welche Funken auf Distanz zu geben im Stande ist, so findet man, dass die Funken eine viel grössere Schlagweite haben, wenn man mittelst des Disjunctors nur Oeffnungsfunken zwischen den Polspitzen überschlagen lässt, als wenn nur Schliessungsfunken überspringen können.

Wenn also auch die Quantität der Elektricität, welche die Nebenspirale bei der Oeffnung des Hauptstromes durchströmt, dieselbe ist, wie bei der Schliessung des Hauptstromes, so ist doch die Tension des Oeffnungsstromes in der Inductionsspirale bei weitem grösser, als die Tension des Schliessungsstromes. Suchen wir eine Erklärung für diese Thatsache zu finden.

Nehmen wir an, dass der Strom in der Hauptspirale momentan seine volle Stärke erlange, dass er diese Stärke während einer gewissen Zeit unverändert beibehalte, um dann ebenso plötzlich aufzuhören, so ist kein Grund vorhanden, warum irgend eine Verschiedenheit (die Richtung ausgenommen) zwischen dem Oeffnungsschlag und dem Schliessungsschlag stattfinden sollte. Da nun aber bei Schliessung der Hauptspirale ein Extrastrom in derselben entsteht, welcher dem Hauptstrome entgegengesetzt gerichtet ist, so wird es eine gewisse Zeit dauern, bis derselbe seine volle Stärke erlangt, und dadurch wird auch der Verlauf des Schliessungsstromes in der Nebenspirale auf eine längere Zeit t ausgedehnt. Bei der Unterbrechung sinkt der Hauptstrom rasch von seiner grössten Stärke auf 0 herunter; die Zeit t', während welcher der Oeffnungsstrom in der Nebenspirale verläuft, ist also weit kürzer, als die Dauer t des Schliessungsstromes.

Da nun aber die Quantität der Elektricität, welche den Nebendraht durchströmt, im Ganzen für den Schliessungsstrom ebenso gross ist wie für den Oeffnungsstrom, während der letztere doch von viel kürzerer Dauer ist, so ist klar, dass die Intensität des Oeffnungsstromes viel bedeutender sein muss, als die des Schliessungsstromes.

Auf einem ähnlichen Grunde beruht die Thatsache, dass es für den Verlauf der elektromotorischen Kraft des Inductionsstromes nicht gleichgültig ist, ob die Verstärkung der Inductionswirkung durch Eisen mittelst Einschiebens eines massiven Eisenstabes oder eines Bündels dickerer oder dünnerer (von einander isolirter) Eisendrähte bewerkstelligt wird.

Die in dem massiven Eisenstab hervorgerufenen Inductionsströme wirken verzögernd auf die Inductionswirkung des primären Stromes ein. Je mehr das Eisen vertheilt und durch Isolirschichten das Zustandekommen von Inductionsströmen in seiner Masse verhindert wird, desto grösser wird unter sonst gleichen Verhältnissen die Spannung der Inductionsströme der secundären Spirale. Daraus folgt auch, dass eine Verstärkung der physiologischen Wirkung durchaus nicht immer auch

von einer vermehrten galvanometrischen Wirkung begleitet zu sein braucht.

Am einfachsten lässt sich dies auf folgende Art zeigen. Man schliesse die Nebenspirale durch einen Multiplicator und beobachte die Ablenkung der Nadel, wenn der Hauptstrom geschlossen, oder wenn er unterbrochen wird für die Fälle, dass entweder nichts, oder ein massiver Eisenstab, oder ein Drahtbündel in die Höhlung der Spirale eingeschlossen ist. Bei einer solchen Versuchsreihe wurden folgende Ablenkungen der Multiplicatornadel erhalten:

Ohne Einschiebung	6,5°
Mit einem Bündel dünner Eisendrähte (1 mm dick, gefirnisst)	45
Mit einem Bündel dicker Eisendrähte (2 mm dick, gefirnisst)	48
Mit einem massiven Eisenkern	63

Der Hauptstrom war durch ein kleines Daniell'sches Element erzeugt worden. Bei rasch auf einander folgenden Schliessungen und Oeffnungen des Hauptstromes waren ohne Einschiebung die Schläge, selbst bei befeuchteten Händen, nicht über das Handgelenk fühlbar; nach Einschiebung des massiven Eisenstabes ging der Schlag in der eben angedeuteten Stärke durch zwei Personen, nach Einschiebung des Bündels dickerer Drähte durch vier, während das Bündel dünner Drähte die Schläge in gleicher Stärke in einer Kette von fünf Personen fühlbar machte.

Zehn der dünneren und fünf der dickeren Eisenstäbchen gaben, in die Spirale eingeschoben, ebenso starke Schläge wie der massive Eisenstab; bei physiologischer Gleichheit waren aber die galvanometrischen Wirkungen sehr ungleich, denn es war die Ablenkung des Galvanometers

für die 10 dünneren Stäbchen	28°
für die 5 dickeren Stäbchen	36
für den massiven Eisenstab	63

Mit einer anderen Inductionsspirale, welche aus 600 m eines nur 1 mm dicken Drahtes gebildet war, zeigten sich die galvanometrischen Effecte bei weitem schwächer (ohne Einschiebung von Eisen höchstens 2°, bei eingeschobenem massivem Eisenstab 20°), während die physiologischen Effecte viel kräftiger waren.

Im Magnetisiren von Stahlnadeln zeigt sich der durch die Drahtbündel, im Magnetisiren von weichem Eisen der durch den Eisenstab inducirte Strom überlegen.

Da nun das Elektromagnetisiren des weichen Eisens einen andauernden Strom erfordert, das Magnetisiren des Stahls aber auch bei den plötzlichsten Entladungen erfolgt, so kann dies Resultat als entscheidend für die Annahme gelten, dass in einem durch ein Drahtbündel inducirten Strom eine bestimmte Elektricitätsmenge in

kürzerer Zeit sich durch den Draht bewegt, als wenn dieselbe durch einen massiven eisernen Cylinder in Bewegung gesetzt wird.

Der Funkeninductor Ruhmkorff's. Durch Vergrösserung 231
der Dimensionen, insbesondere aber dadurch, dass man zur Construction der Nebenspirale einen möglichst langen und dünnen Kupferdraht verwendet und für die Isolation der einzelnen Windungen möglichste Sorgfalt trägt, lassen sich die Spannungserscheinungen des Inductionsapparates bedeutend steigern, namentlich aber lassen sich zwischen den genäherten Drahtenden der Inductionsspirale Funken von namhafter Länge erzielen.

Solche Inductionsapparate nun, welche vorzugsweise dazu construirt sind, recht lange Inductionsfunken zu geben, könnte man zum Unterschiede von den gewöhnlichen Inductionsapparaten als Funkeninductoren bezeichnen. Häufig werden solche Apparate auch Ruhmkorff'sche genannt, weil Ruhmkorff, ein vor einigen Jahren verstorbener deutscher Mechaniker in Paris, der erste in Europa war, der sie (1848) in grösseren Dimensionen ausgeführt hat. Derselbe Apparat war aber schon 1838 in den Vereinigten Staaten Amerikas von Page construirt und publicirt worden *).

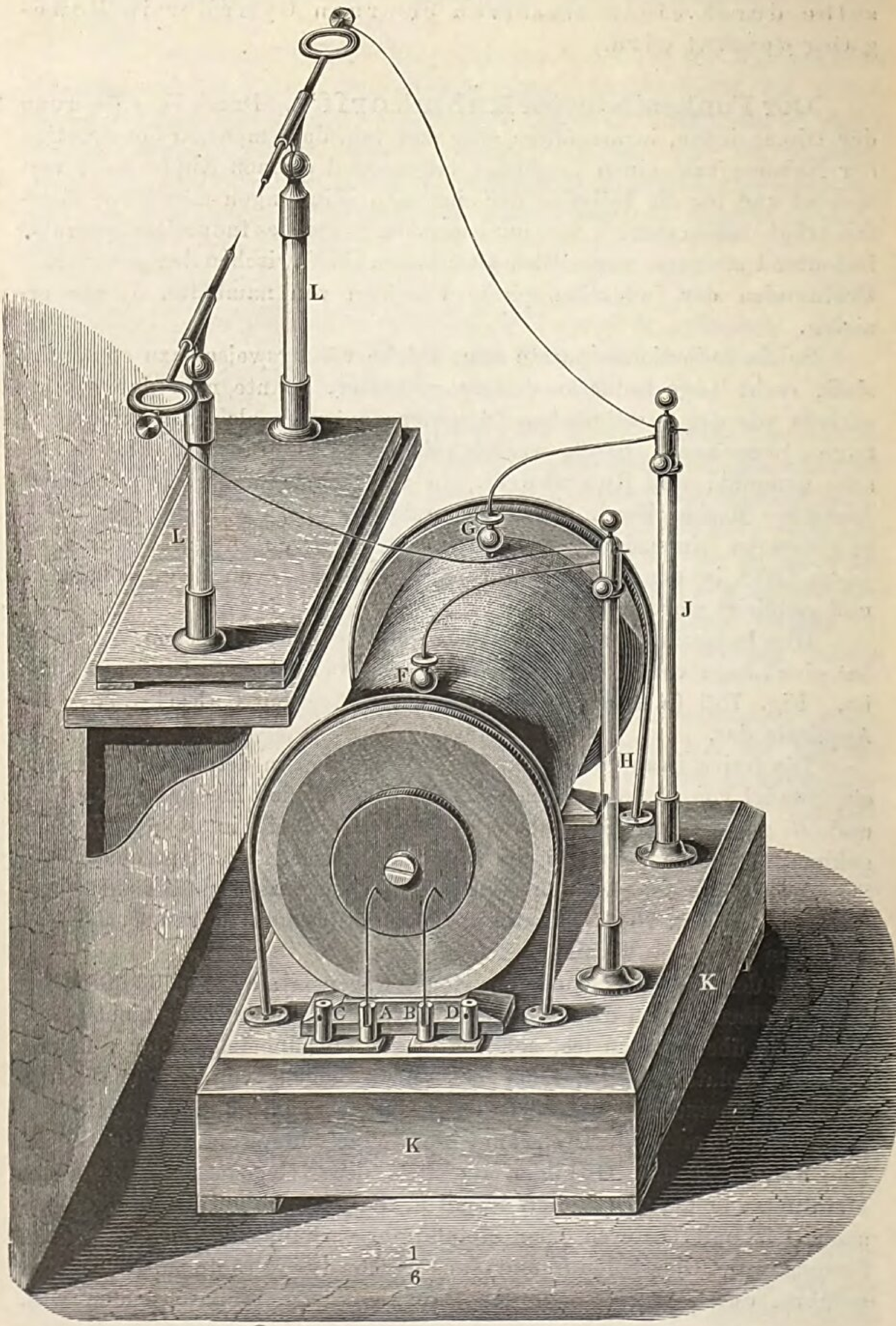
Die Inductionsspirale der kleineren Ruhmkorff'schen Apparate hat eine Länge von 35 cm, während dieselbe bei den grössten 65 cm lang ist. Fig. 753 (a. f. S.) stellt einen der grösseren Ruhmkorff'schen Apparate dar.

Die freien Drahtenden der Hauptspirale, in deren Höhlung sich ein Bündel von Eisenstäbchen befindet, sind zu den Messingsäulchen A und B geführt (die Schrauben, mittelst deren sie in A und B festgeklemmt werden, sind in der Figur fortgelassen worden, ebenso die Schraubenköpfe der Säulchen C und D und der entsprechenden Messingsäulchen in Fig. 754). A steht mit dem Messingsäulchen C, B steht mit D in leitender Verbindung.

Bei den kleineren Apparaten ist die Nebenspirale durch 33 000 Windungen eines $^1/_3$ mm dicken Kupferdrahtes gebildet, welcher nicht allein mit Seide übersponnen ist, sondern dessen einzelne Lagen der vollständigeren Isolation wegen noch mit einer Schicht von geschmolzenem Schellack überzogen sind. Bei den grössten Apparaten wächst, bei einer Dicke von $^1/_5$ mm, die Drahtlänge der Inductionsspirale auf 100 000 m. Die Kugeln F und G bilden die Pole der Nebenspirale. Die obere Metallfassung der Glassäule H ist mit F, die obere Metallfassung der Glassäule J ist mit G durch einen Metalldraht verbunden. Von den Metallfassungen der Glassäulen H und J aus werden dann Drähte zu den Leitern geführt, durch welche man den Inductionsstrom hindurchsenden will.

*) Uppenborn, Geschichte der Transformatoren, S. 4.

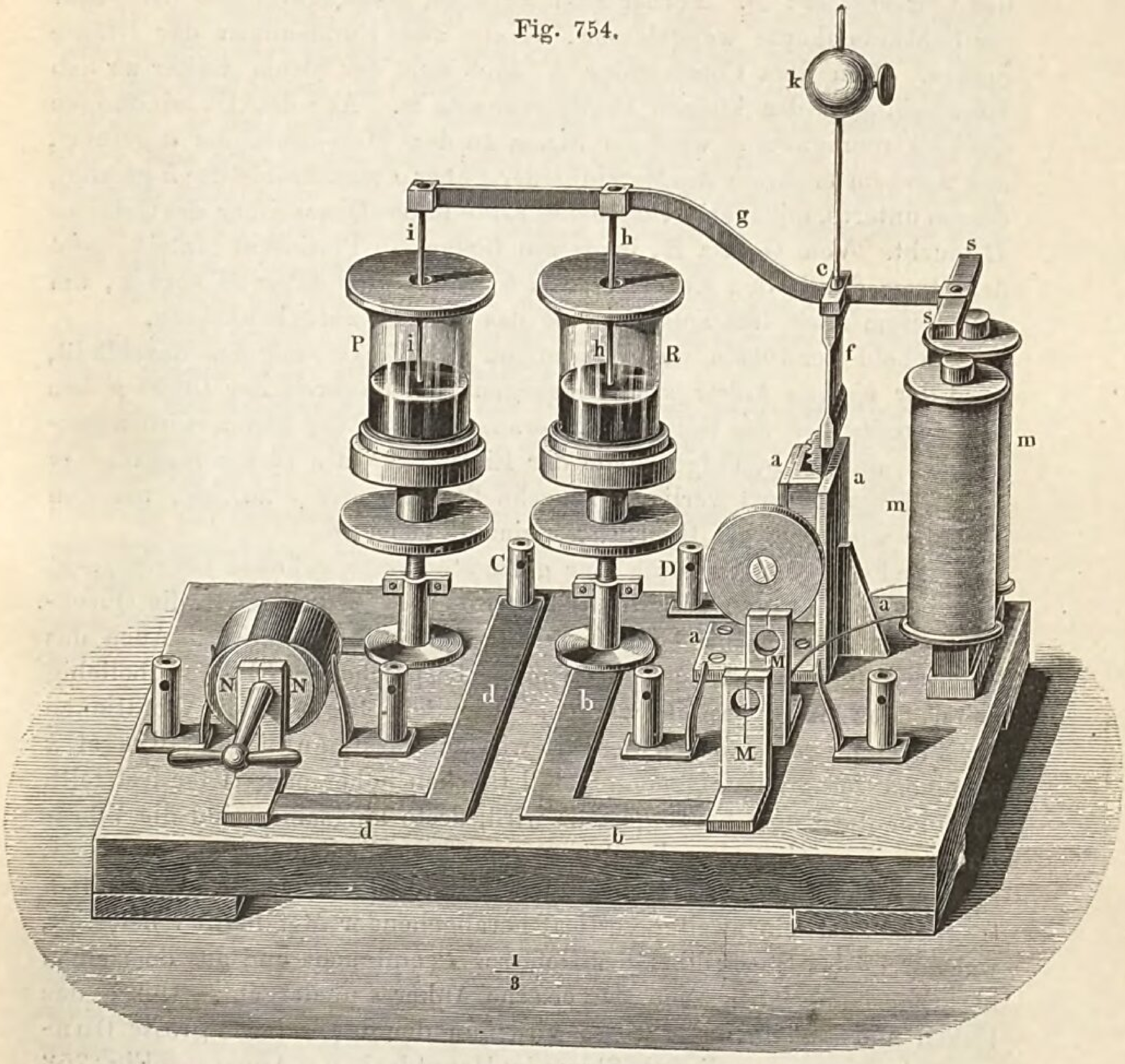
Fig. 753.



Unsere Figur zeigt die Verbindung mit dem allgemeinen Auslader *L L*, wo die Funken zwischen zwei Platinspitzen überspringen, deren Abstand man nach Belieben vergrössern oder verkleinern kann.

Die Unterbrechung des Hauptstromes wird bei den kleineren Apparaten durch eine dem Wagner'schen Hammer ähnliche Vorrichtung in der Weise hervorgebracht, dass die Hauptspirale mit ihrem Eisendraht-

Fig. 754.



bündel die Rolle des Elektromagnets spielt. Bei den grösseren Apparaten dagegen wird zur Unterbrechung des Hauptstromes Foucault's Interruptor gebraucht, dessen Einrichtung durch Fig. 754 erläutert wird und dessen charakteristische Eigenthümlichkeiten darin bestehen, dass erstens der Strom, welcher das Hammerwerk in Bewegung setzt, ein anderer ist als der weit stärkere, welcher die Hauptspirale durchläuft, und das zweitens die Schliessung und Unterbrechung des Stromes durch Eintauchen und Herausziehen eines Platinstiftes in und aus

Quecksilber bewerkstelligt wird. Betrachten wir diese Vorrichtung etwas näher.

Der positive Poldraht eines einfachen Zinkkohlenbechers führt den Strom zu dem Commutator *M*, dessen Construction wir bereits §. 118 kennen gelernt haben. In unserer Figur ist absichtlich die Walze des Commutators weggelassen, welche vollkommen ebenso erscheint, wie die des Commutators *N*. Ferner sind an allen Messingsäulchen der Figur die Schraubenköpfe weggelassen, welche zum Einklemmen der Drähte dienen. Von dem Commutator *M* geht nun der Strom weiter zu den Umwindungen des kleinen Elektromagnets *m*. Aus den Umwindungen des Elektromagnets *m* wird der Strom zu dem Messingständer *a* geführt, aus welchem er durch die Messingfeder *f* über *g* zum Stahlstifte *h* gelangt, dessen unteres, mit Platin versehenes Ende in das Quecksilber des Gefässes *R* taucht. Vom Gefäss *R*, in dessen Boden ein Platinstift eintritt, geht der Strom durch den Kupferstreifen *b* zum Commutator *M* zurück, um von diesem nach dem anderen Pole des Bechers zurückzukehren.

Sobald der Strom die Windungen des Elektromagnets durchläuft, wird der eiserne Anker *s* herabgezogen und dadurch der Draht *h* aus dem Quecksilber des Gefässes *R* herausgezogen, der Strom wird unterbrochen, und da in Folge davon der Eisenanker des Elektromagnetes *m* seinen Magnetismus verliert, so schnellt die Feder *f* zurück, um den Draht *h* wieder in das Quecksilber einzutauchen etc.

Die Feder *f* kann durch eine gezahnte Stange gehoben oder gesenkt und ihre Stellung so regulirt werden, dass der Stift *h* eben die Quecksilberoberfläche berührt oder doch nur ganz wenig eintaucht. Auch das Gefäss *R* (ebenso wie das sogleich zu besprechende *P*) kann beliebig höher oder tiefer gestellt werden. Die Schnelligkeit der Vibrationen der Feder *f* kann dadurch regulirt werden, dass man die Metallkugel *k* an einem von *c* aufsteigenden Metallstäbchen höher oder tiefer feststellt. Je höher die Kugel heraufgestellt wird, desto langsamer sind die Vibrationen; sie werden am schnellsten, wenn man die Kugel *k* ganz entfernt.

An dem Ende des horizontalen Metallbalkens, welcher den Stift *h* trägt, ist aber ein zweiter vertical herabgehender Metallstift *i* befestigt, welcher in das Quecksilber des Gefässes *P* eintaucht und aus demselben herausgezogen wird, wenn der eiserne Anker *s* niedergeht. Durch das Heben und Senken dieses Stiftes wird nun der durch sechs grosse Bunsen'sche Elemente gelieferte Strom im Hauptdraht des Apparates Fig. 753 abwechselnd unterbrochen und wieder geschlossen. Die Poldrähte dieser Säule sind in die beiden Messingsäulchen des Commutators *N* eingeschraubt, welchen wir zunächst so gestellt denken wollen, dass der positive Strom durch den vorderen Theil der Commutatoraxe austritt und durch den Kupferstreifen *d* zum Messingsäulchen *C* gelangt.

Von *C* des Interruptors führt ein Draht nach *C* des Apparates Fig. 753 (welcher im halben Maassstabe der Fig. 754 gezeichnet ist), so dass der positive Strom über *C* und *A*, Fig. 753, in die Hauptspirale

eintritt. Der die Hauptspirale verlassende Strom geht dann über *B* und *D* der Fig. 753 nach *D* der Fig. 754 und von da über *a*, *f* und *g* durch den Stift *i* in das Quecksilber des Gefässes *P*, um von diesem endlich durch einen nicht bezeichneten Kupferstreifen zum Commutator *N* und der Säule zurückzukehren.

Dieser Strom wird nun durch die Vibrationen der Feder *f* am unteren Ende des Stiftes *i* abwechselnd unterbrochen und geschlossen.

In den Gefässen *P* und *R* wendet man statt des reinen Quecksilbers vortheilhafter ein Platinamalgam an, welches einen ziemlich dickflüssigen Brei bildet. Auf dieses Platinamalgam wird dann Weingeist gegossen, so dass nach dem Herausziehen des Stiftes aus dem Amalgam gleich eine Schicht des isolirenden Weingeistes zwischen die eben getrennten Metalltheile tritt, was nach den Beobachtungen von Poggendorff bewirkt, dass der Strom rascher vollständig unterbrochen wird, dass also die Intensität des inducirten Stromes wächst.

Es bleibt uns jetzt nur noch die Besprechung des Condensators übrig, durch dessen Anwendung Fizeau die Wirkung des Ruhmkorff'schen Apparates bedeutend gesteigert hat.

In den Schliessungsbogen der Hauptspirale wird nämlich ein nach dem Princip der Leydener Flasche oder der Franklin'schen Tafel construirter Condensator so eingeschaltet, dass im Moment der Unterbrechung des Stromes die Hauptspirale gewissermaassen durch den Condensator geschlossen ist. Dieser Condensator ist gewöhnlich in der auf S. 234 besprochenen Weise aus einem auf beiden Seiten mit Stanniol belegten Stück Wachstaffet gebildet und in dem Kasten *K*, Fig. 753, angebracht, welcher den ganzen Apparat trägt.

Das Messingsäulchen *C* (Fig. 753) steht mit der einen, *D* steht mit der anderen Belegung dieses Condensators in leitender Verbindung, so dass in dem Momente, in welchem der Hauptstrom in *P* unterbrochen wird, der dabei sich bildende Extrastrom gewissermaassen durch den Condensator aufgenommen wird.

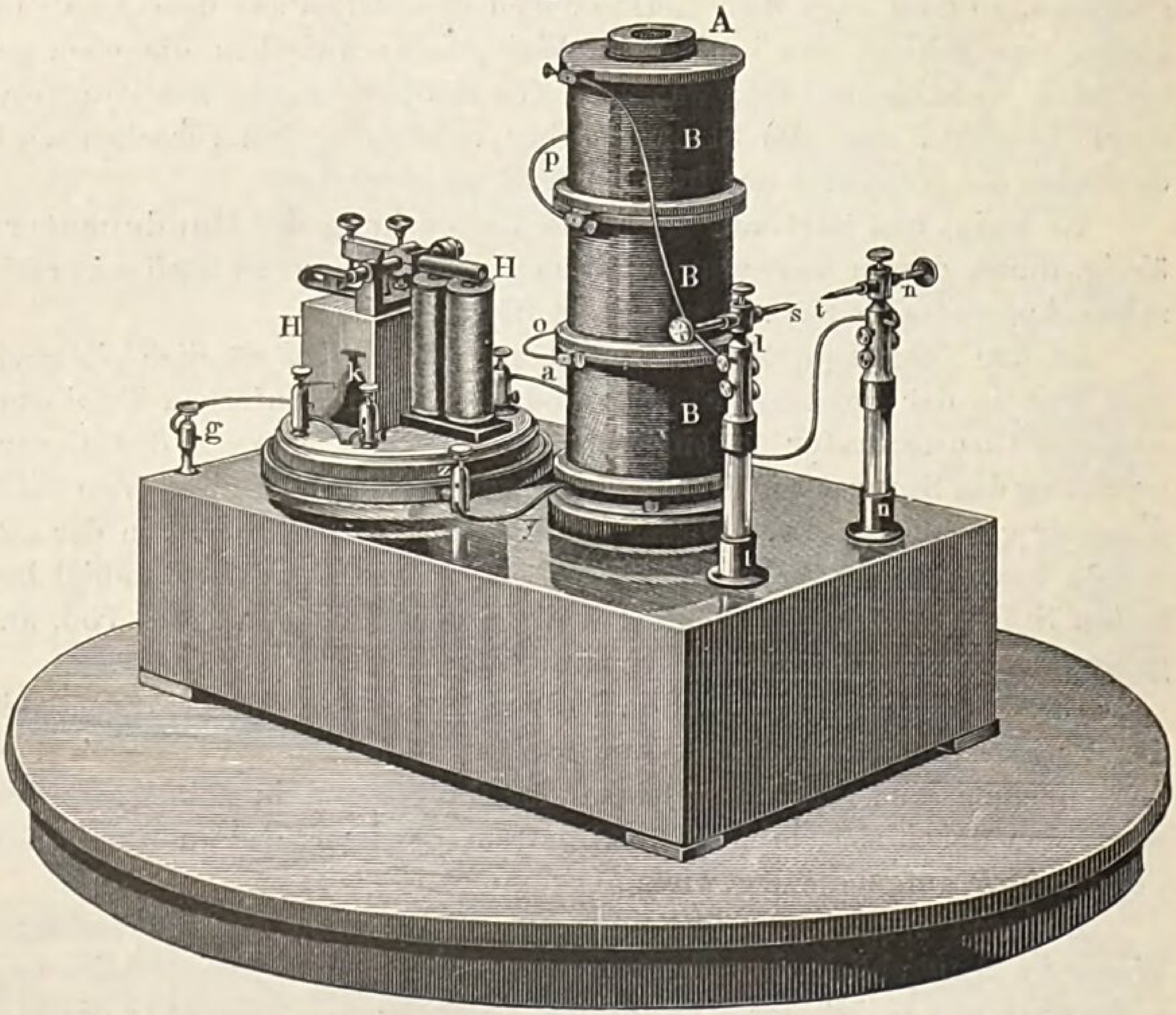
Dadurch erklärt sich nun auch die Wirksamkeit des Condensators. Wenn im Augenblick der Stromunterbrechung keine Nebenschliessung vorhanden ist, so ist der Verlauf des Extrastromes gehemmt; die mit Gewalt gegen die Unterbrechungsstelle hingetriebene Elektricität wird zwar theilweise durch das Ueberspringen eines glänzenderen Funkens entladen, der Rest aber muss in dem Hauptdraht selbst seine Ausgleichung suchen, er muss in demselben zurückströmen und dadurch wird die inducirende Wirkung auf den Nebendraht bedeutend geschwächt.

Ist aber der Condensator eingeschaltet, so wird der Extrastrom durch denselben vollständig aufgenommen und es findet keine Rückströmung im Hauptdraht statt. Ein Beweis für die Richtigkeit dieser Ansicht liegt darin, dass durch die Einschaltung des Condensators die Funken an der Unterbrechungsstelle der Hammervorrichtung schwächer werden.

Zum Schluss mag noch bemerkt werden, dass beim Entwerfen der Zeichnung Fig. 753 und 754 lediglich im Interesse der leichteren Uebersichtlichkeit einige im Uebrigen unwesentliche Abweichungen von dem Ruhmkorff'schen Apparat vorgenommen wurden.

Wenden wir uns nun zur Betrachtung der von Stöhrer in Dresden construirten Funkeninductoren. Haupt- und Nebenspirale sind bei denselben vertical gestellt, wie man Fig. 755 sieht, welche einen kleinen Stöhrer'schen Apparat älterer Construction darstellt, die aber im Wesentlichen auch mit der Anordnung der neueren Apparate überein-

Fig. 755.

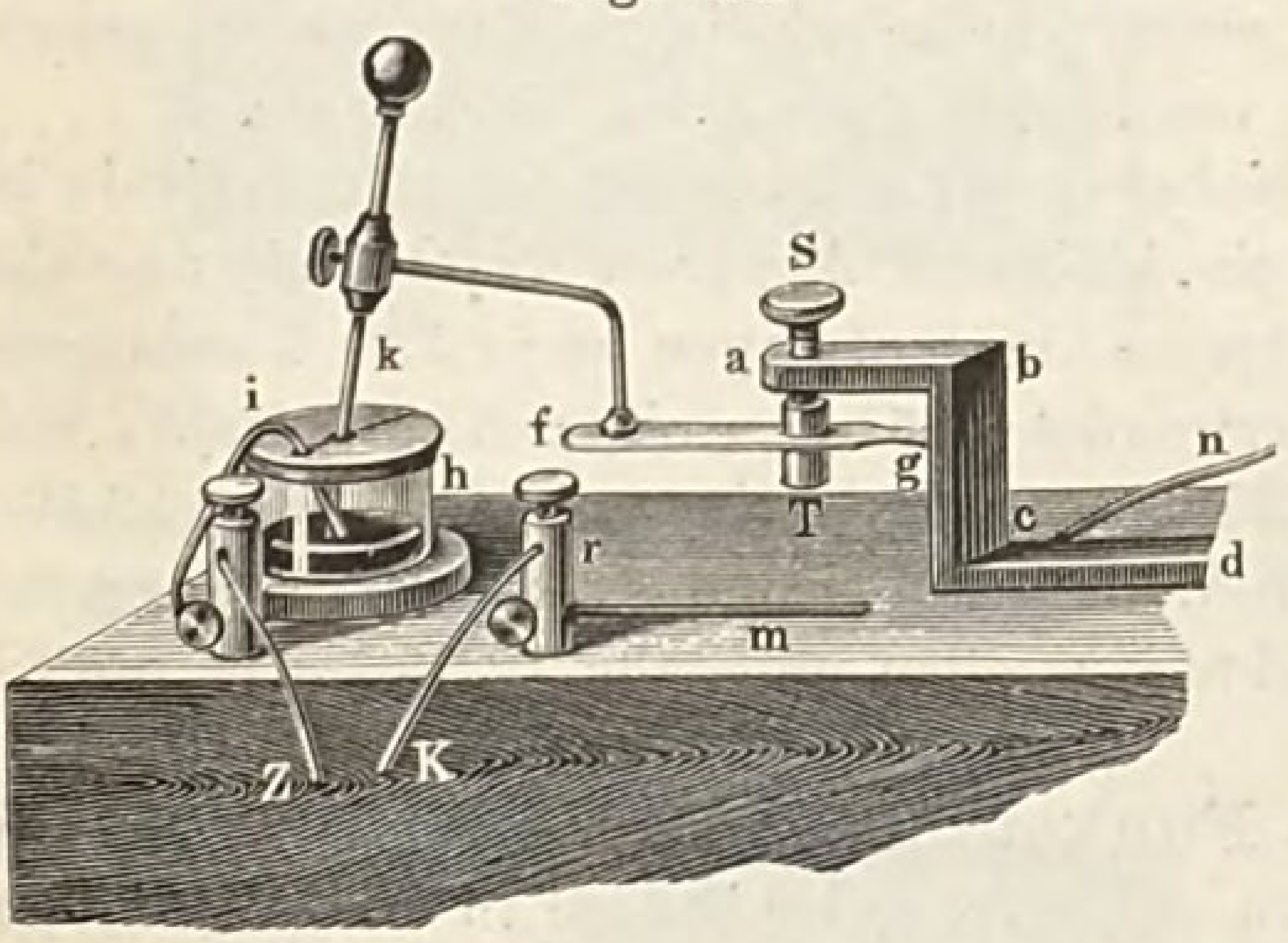


stimmt. Die Hauptspirale A, deren Höhlung mit einem Bündel weicher Eisenstäbchen gefüllt ist, ist von der Nebenspirale B umgeben, welche hier aus drei Abtheilungen besteht. s und t sind die von isolirenden Glassäulen getragenen Platinspitzen, welche die Pole der Inductionsspirale bilden, zwischen denen also die Funken überspringen. H ist der Unterbrecher, welcher im Wesentlichen mit dem Wagner'schen Hammer übereinstimmt. Der Condensator befindet sich in einer Schieblade des Kastens, auf welchem der ganze Apparat steht.

Bei den neueren Apparaten hat Stöhrer zur Unterbrechung des Hauptstromes gleichfalls einen Quecksilber-Interruptor in Anwendung gebracht. Fig. 756 zeigt die Einrichtung desselben bei den klei-

neren Apparaten. Der horizontale Arm *cd* des zweimal rechtwinklig gebogenen Eisenstückes *abcd* erstreckt sich bis unter die vertical stehende Hauptspirale, und auf dem Ende dieses eisernen Streifens stehen die Eisenstäbchen auf, welche die Höhlung der Hauptspirale füllen. Wenn also der Strom durch die Hauptspirale geht und dadurch die Eisenstäbchen in ihrer Höhlung magnetisch werden, so wird auch das Eisenstück *abcd* sammt der unten etwas vorragenden eisernen Schraube *S* magnetisch. Die magnetische Schraube *S* zieht den eisernen Cylinder *T* an, welcher in dem federnden Messingstreifen *fg* befestigt ist. Sobald der Strom unterbrochen wird, schnellt die Feder wieder zurück. Die Verlängerung der Feder trägt einen Draht *k*, an welchem oben eine Kugel befestigt ist und welcher unten in das Quecksilber des Glasgefässes *h* eben eintaucht. Durch die Vibration der Feder *fg* wird der Draht *k* abwechselnd in das Quecksilber eingesenkt und herausgezogen. Durch den Draht *i* wird der Strom dem Quecksilber zugeführt, und wenn der Draht *k* in das (mit Weingeist bedeckte) Quecksilber eintaucht, so geht der Strom von *k* zur Feder *fg* zu dem Eisenstück *abcd*, von welchem aus derselbe durch den Draht *n* in die Hauptspirale eintritt. Nachdem er die Windungen derselben durchlaufen hat, wird er durch den Draht *m* der Klemmschraube *r* und von dieser dem anderen Pol des Rheomotors zugeführt.

Fig. 756.



In unserer Zeichnung sind der Einfachheit wegen die zum Condensator führenden Kupferstreifen, sowie eine Vorrichtung zur leichten Unterbrechung des Stromes weggelassen.

Bei den grösseren Stöhrer'schen Funkeninductoren hat der Interruptor eine ganz ähnliche Einrichtung, nur ist er auf einem besonderen vom Stativ der Haupt- und Nebenspirale ganz getrennten Gestelle angebracht, weshalb denn auch die Schwingungen der Feder durch einen besonderen kleinen Elektromagnet bewerkstelligt und unterhalten werden. Hier ist es aber derselbe Strom, welcher die Windungen des Elektromagnets und die Windungen der Hauptspirale durchläuft.

Eine ganz eigenthümliche Einrichtung haben die Inductionsrollen der neueren Stöhrer'schen Apparate. Bei der gewöhnlichen Art, die Spiralen zu wickeln, bei welcher jede Lage einen hohlen Cylinder von der Gesammtlänge der Spirale bildet, sind der Anfang der einen und das unmittelbar darauf liegende Ende der folgenden Lage durch die Drahtlänge zweier ganzen Lagen getrennt, sie haben also eine bedeu-

tende Spannungsdifferenz, in Folge deren die isolirende Zwischenschicht leicht durchbrochen wird.

Ist eine solche Durchbrechung erfolgt, so ist dadurch der wirksame Theil der Inductionsspirale um zwei ganze Drahtlagen vermindert. Poggendorff suchte diesen Uebelstand dadurch zu beseitigen, dass er die Inductionsspirale aus mehreren kürzeren Spiralen zusammensetzte. Nach diesem Princip ist dann auch die Inductionsspirale B der älteren Stöhrer'schen Apparate, Fig. 755, aus drei kürzeren Spiralen zusammengesetzt. Das innere Drahtende der mittleren Spirale ist mit dem äusseren der untersten, und das äussere Drahtende der mittleren ist mit dem inneren der obersten verbunden.

Bei seinen neueren Apparaten ist nun Stöhrer in dieser Richtung noch weiter gegangen, indem er die einzelnen Lagen nicht mehr aufwickelte, dass sie einen hohlen Cylinder, sondern so, dass sie eine Scheibe bildeten, deren Ebene rechtwinklig auf der Axe der Spirale stand. Wenn die Windungen einer Scheibe von innen nach aussen gehen, so gehen sie in der nächsten von aussen nach innen zurück etc.

Der Draht der in gewöhnlicher Weise gewickelten Hauptspirale ist ungefähr 2 mm dick. Für die kleineren Apparate besteht sie aus vier Lagen zu je 80, bei den grösseren aus fünf Lagen zu je 120 Windungen. Für die Inductionsspirale verwendet Stöhrer einen Kupferdraht, welcher nur $^1/_6$ mm dick ist. Die kleineren Inductionsspiralen haben 18 400, die grösseren haben 36 900 Windungen, so dass die Drahtlänge der grösseren Stöhrer'schen Inductionsrollen ungefähr 12 600 m beträgt.

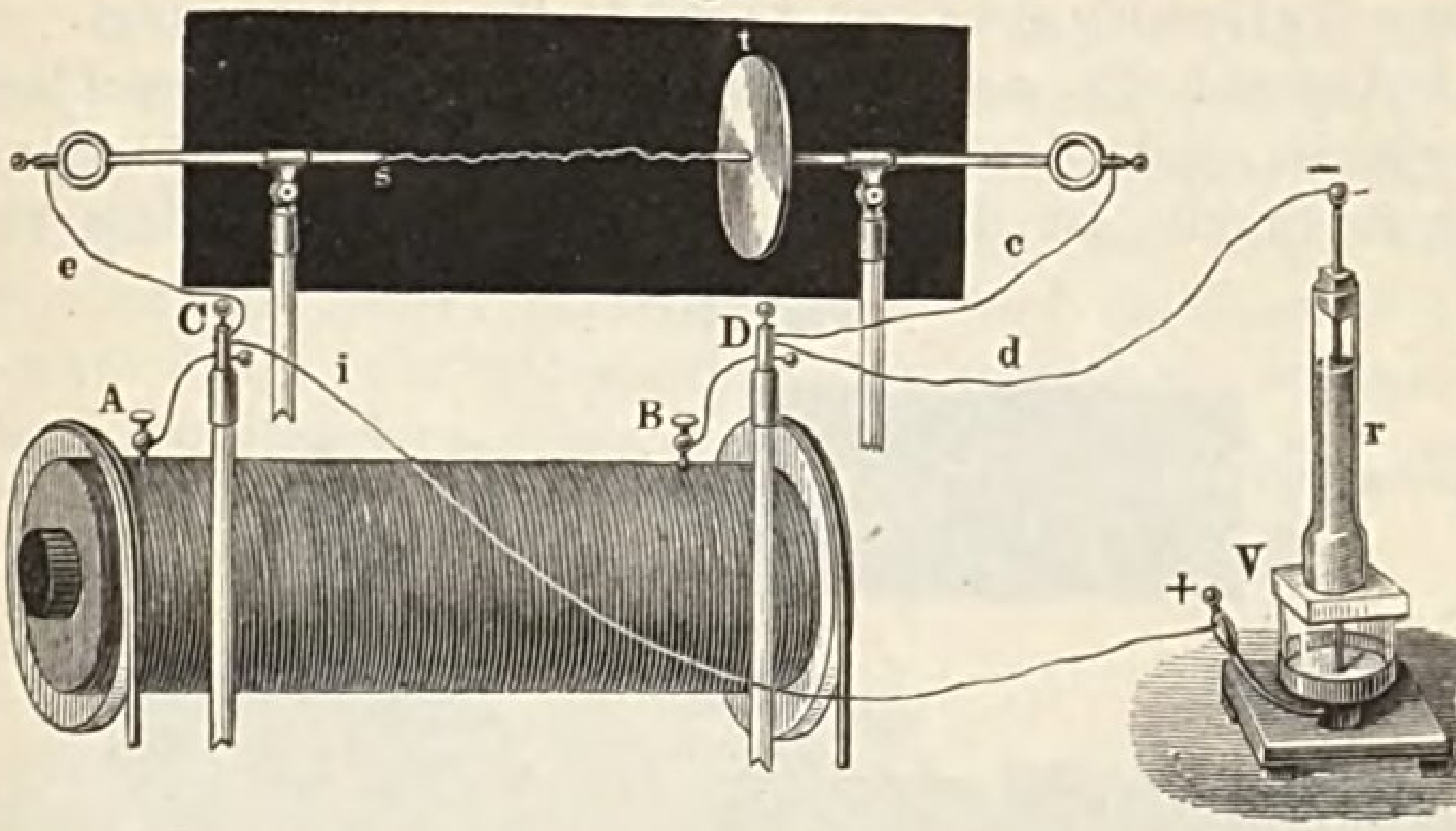
232 **Versuche mit dem Funkeninductor.** Sobald der Funkeninductor mit einer Säule von entsprechender Stärke in Verbindung gebracht und der Interruptor in Thätigkeit gesetzt ist, springen zwischen den beiden Metallspitzen, die mit den Drahtenden der Inductionsrolle leitend verbunden sind, kräftige Funken über, und zwar auf eine Entfernung von 6 bis 8 cm bei den kleineren und auf 20 cm bei den grösseren Stöhrer'schen Apparaten. Die grössten Ruhmkorff'schen Apparate liefern 45 cm lange Funken.

Bei grösseren Apparaten wendet man einen besonderen Auslader an, zwischen dessen Spitzen die Funken überspringen. Fig. 753, Seite 868 zeigt, wie dieser Auslader mit dem Apparate zu verbinden ist. Bei dem Auslader der grösseren Stöhrer'schen Apparate stehen die Polspitzen in verticaler Richtung einander gegenüber. Um möglichst grosse Schlagweite zu erhalten, ist es vortheilhaft, die negative Polspitze mit einer Messingplatte von ungefähr 2 dm Durchmesser zu vertauschen, wie man Fig. 757 sieht. Wenn es sich nur um die zwischen s und t überspringenden Funken handelt, bleibt der alsbald näher zu besprechende Apparat V sammt den Zuleitungsdrähten d und i ganz weg.

Wenn man in der Weise, wie es Fig. 758 zeigt, eine Nebenschliessung herstellt, in welche eine kleine Leydener Flasche eingeschaltet ist (die

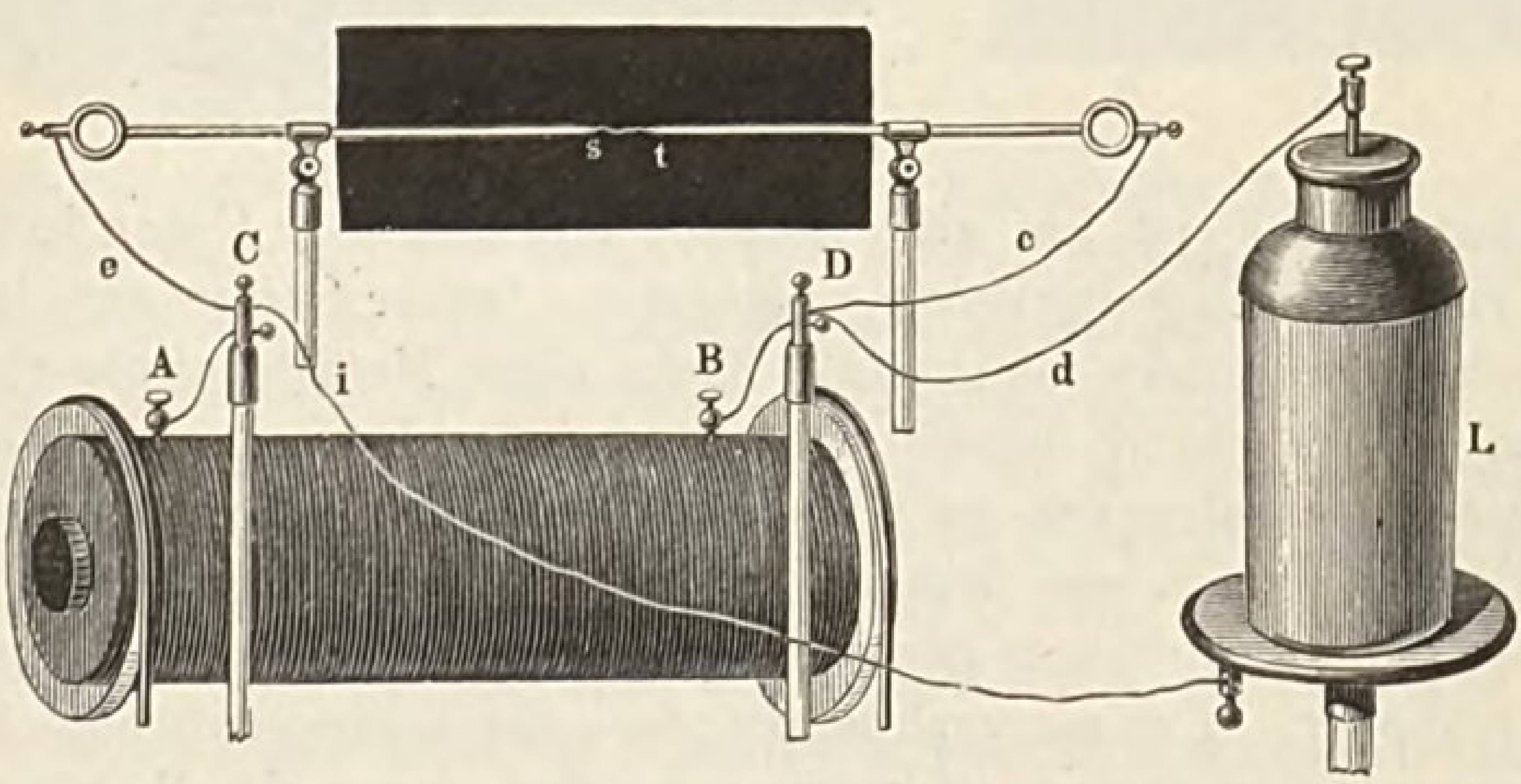
äussere Belegung ist durch den Draht *i* mit dem einen, die innere durch den Draht *d* mit dem anderen Pol der Inductionsrolle verbunden), wird die Elektricität erst bis zu einem gewissen Grade auf den Belegungen der Flasche angehäuft, ehe ein Ueberspringen des Funkens zwischen den Spitzen des Ausladers erfolgen kann, die aber nun mindestens bis auf die Schlagweite der Flasche genähert sein müssen. Die Funken sind also jetzt viel kürzer, aber weit kräftiger, blendend hell und von

Fig. 757.



einem eigenthümlichen durchdringenden Geräusch begleitet. Die so erzeugten Funken sind es, welche zur Untersuchung der Metallspectra (Bd. II, 1) angewandt werden.

Fig. 758.

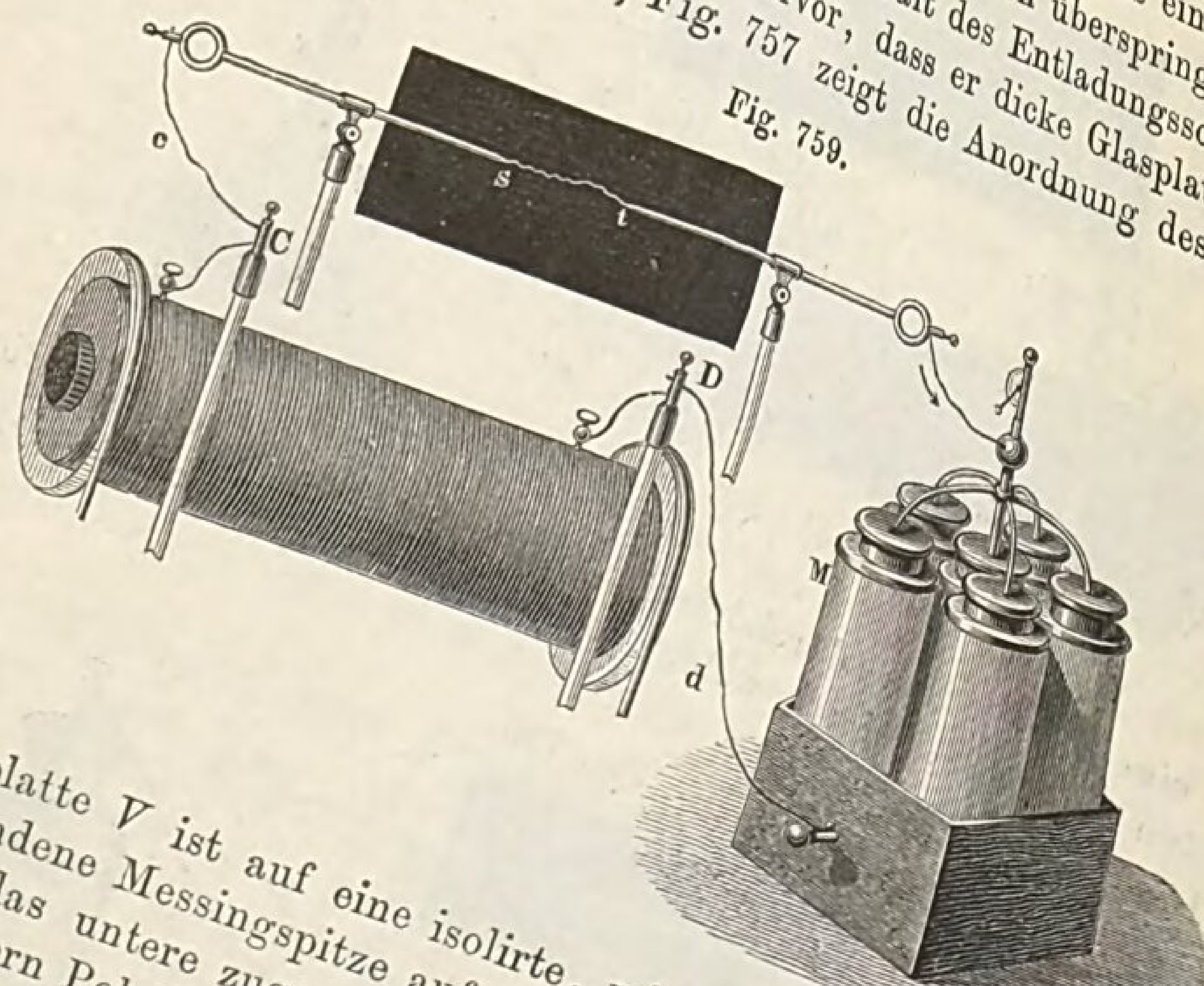


Um eine **constante Ladung** einer elektrischen Batterie zu erhalten, muss man die Anordnung Fig. 759 (a. f. S.) anwenden. Die Batterie ist hier nicht in eine Nebenschliessung eingeschaltet, sondern in den Weg von dem einen Pol *D* der Inductionsspirale zur einen Spitze *t* des Ausladers, d. h. die äussere Belegung ist mit dem Pol *D*, die innere mit der Spitze *t* des Ausladers leitend verbunden. Vom Pol *C* führt dann ein Leitungsdraht zur andern Spitze *s* des Ausladers. Wenn die Spitzen *s* und *t* einander nahe gestellt sind, so ist eine constante Ladung der

Batterie nicht möglich, weil jeder Schliessungsschlag der inneren Belegung die entgegengesetzte Elektricität derjenigen zuführt, welche beim Oeffnungsschlag von s nach t überspringt, wie denn auch bei der in Fig. 758 dargestellten Anordnung die Flasche abwechselnd mit positiver und mit negativer Elektricität geladen wird. Da nun aber die Schlagweite für den Schliessungsschlag weit geringer ist als für den Oeffnungsschlag, so kann man eine constante Ladung der Batterie dadurch erzielen, dass man die Spitzen s und t so weit aus einander stellt, dass nur der Oeffnungsfunken zwischen ihnen überspringt.

Wie bedeutend die mechanische Kraft des Entladungsschlages dieser Apparate ist, geht daraus hervor, dass er dicke Glasplatten durchzuschlagen im Stande ist; Fig. 757 zeigt die Anordnung des Versuchs.

Fig. 759.



Eine Glasplatte V ist auf eine isolirte, mit dem Pol C der Inductionsrolle verbundene Messingspitze aufgesetzt. Dieser Spitze gerade gegenüber steht das untere zugespitzte Ende eines Metalldrahtes r, welcher mit dem andern Pol D leitend verbunden ist. Um zu verhindern, dass der Entladungsschlag um die Glasplatte herumgeht, ist der Draht r mit einem Glasrohr umgeben, dessen Höhlung mit Harz ausgegossen ist. Sobald der Apparat in Gang gesetzt wird, wird die Glasplatte augenblicklich durchbohrt. Um zu verhindern, dass die isolirenden Schichten der Inductionsspirale selbst durchbrochen werden, wenn der Widerstand der Glasplatte zu gross sein sollte, sind die Pole C und D auch mit dem Auslader verbunden, wie die Figur zeigt, damit die Funken nöthigenfalls zwischen s und t überschlagen können. Es versteht sich von selbst, dass man zu diesem Versuch auch das auf S. 267 besprochene Holtz'sche Glasrohr statt des in Fig. 757 dargestellten Apparates V verwenden kann.

Wenn die Spitzen des Ausladers s und t etwas näher zusammengestellt sind, so lassen sich an überschlagenden Funken deutlich zwei

Theile unterscheiden, ein hell leuchtender Lichtstreif in der Mitte, welcher von einer orangerothen, weniger leuchtenden Aureole umgeben ist. Der leuchtende Lichtstreif ist, wie Lissajous durch die Beobachtung des Funkens in einem rotirenden Spiegel nachgewiesen hat, nur momentan, während die Aureole eine längere Dauer hat. Wenn man einen kräftigen Luftstrom gegen den Funken richtet, so wird der Lichtstreif dadurch nicht afficirt, während die Aureole auf die Seite geblasen und von dem Lichtstreif getrennt wird.

Sehr schön kann man diese Trennung auch hervorbringen, wenn man den Funken zwischen den Polen eines kräftigen Elektromagnets überschlagen lässt. Fig. 760 zeigt eine an dem grossen Elektromagnet, Fig. 522, S. 623, anzubringende Vorrichtung, um diesen Versuch anzustellen. Auf die beiden obersten Spulen wird ein Brett *A* aufgesetzt, über welches durch zwei in demselben angebrachte runde Ausschnitte die Eisenkerne des Elektromagnets noch etwas hervorragen. Auf diesem

Fig. 760.

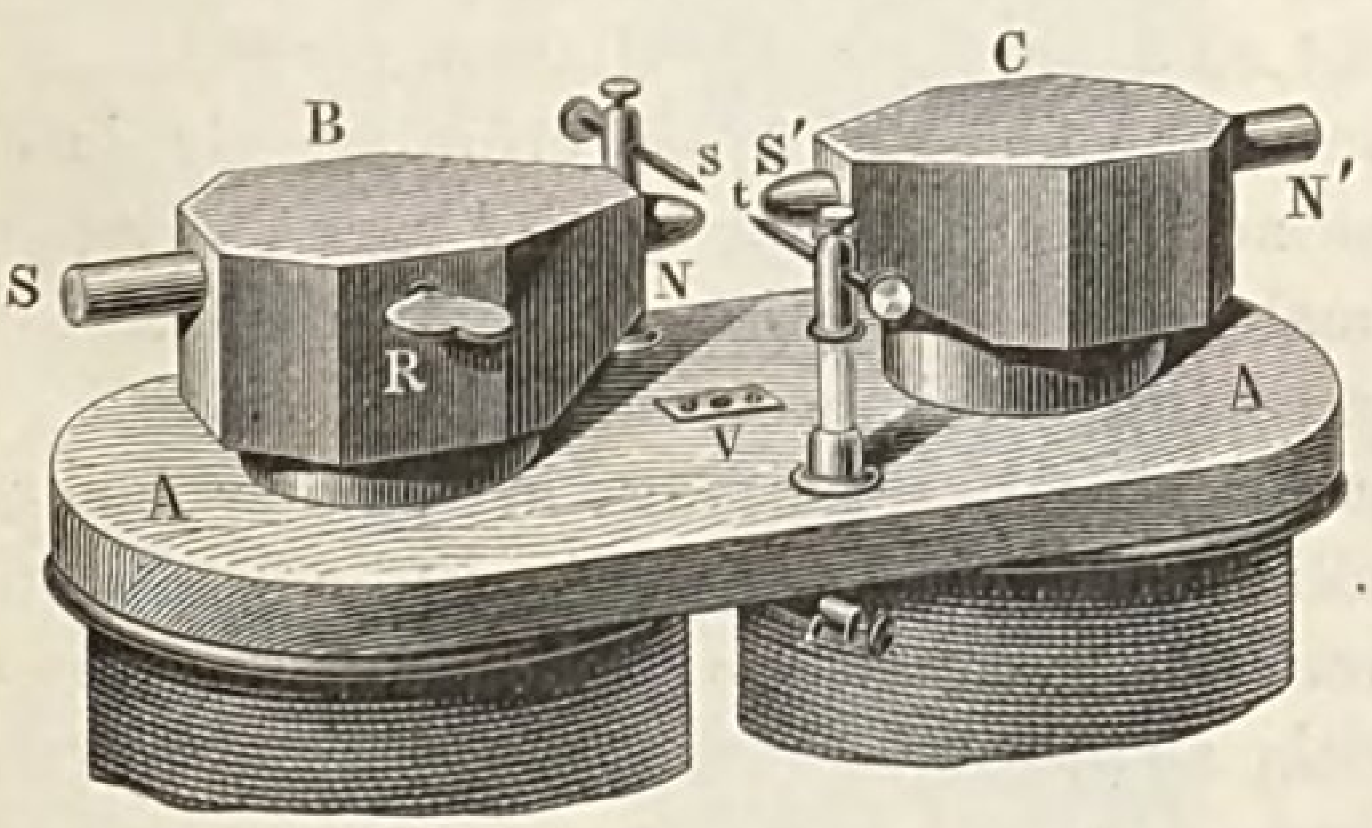
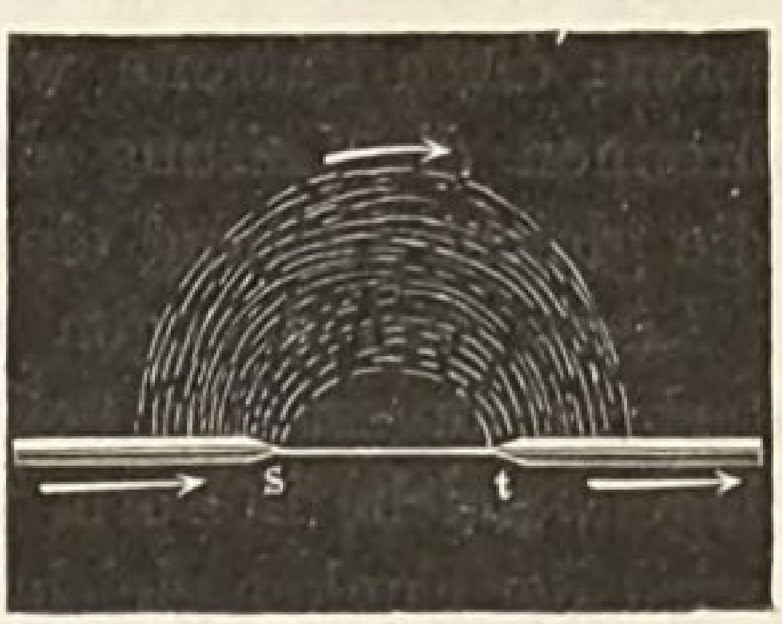


Fig. 761.



Brette können verschiedene Vorrichtungen für später zu besprechende Versuche aufgeschraubt werden. Für unsern Versuch sind zwei Glassäulchen aufgeschraubt, welche die mit den Polen der Inductionsspirale in leitende Verbindung zu setzenden Entladungsspitzen *s* und *t* tragen. Auf die oberen Enden der Eisenkerne sind nun die eisernen Halbanker *B* und *C* aufgesetzt, in welche cylinderförmige Höhlungen zur Aufnahme der Eisenstäbe *SN* und *S'N'* eingebohrt sind. Die einander zugekehrten Enden dieser Eisenstäbe sind abgerundet, wie es die Figur zeigt. Man kann diese Stäbe in ihren Höhlungen vor- und rückwärts schieben und in beliebiger Stellung durch Stellschrauben *R* und *R'* (*R'* ist als auf der Rückseite von *C* befindlich nicht sichtbar) feststellen.

Wenn man die Entladungsfunken zwischen den 1 bis 2 cm von einander abstehenden Polspitzen überschlagen lässt und dann den Elektromagnet in Thätigkeit setzt, so bleibt der helle Lichtstreif ungeändert, die lichtschwächere Aureole aber wird zu einer halbkreisförmigen Scheibe zuammengedrückt, deren Ebene rechtwinklig steht auf der Verbindungslinie der Pole, ungefähr wie es in Fig. 761 und in Farben in Fig. 2 auf beigegebener Tafel dargestellt ist. Je nach

der Stromrichtung der Entladungsfunken und der Polarität des Elektromagnets ist die halbkreisförmige Lichtscheibe entweder von *st* nach oben oder nach unten gerichtet. Sie hat die in Fig. 761 dargestellte Lage, wenn der positive Strom von *s* nach *t* geht und *S'* ein Südpol ist. Wird entweder die Polarität des Magnets oder die Richtung der Entladungsfunken geändert, so kehrt sich die Lichtscheibe nach unten.

Die Lichtscheibe nimmt stets eine solche Lage an, dass der in ihr von dem einen Poldraht zum andern übergehende positive Strom gleich gerichtet ist mit den Molecularströmen der zu seinen beiden Seiten befindlichen Magnetpole.

Auch für die Praxis hat der Funkeninductor bereits eine Bedeutung erlangt, indem er nämlich beim Anzünden von Minen ausgezeichnete Dienste leistet. Die oben S. 521 erwähnte Methode, die Minen durch einen galvanisch glühenden Draht zu entzünden, lässt sich nicht mehr mit Erfolg anwenden, wenn es sich darum handelt, mehrere benachbarte Minen vollkommen gleichzeitig zu entzünden, weil man es nicht wohl dahin bringen kann, dass die dünnen Drähtchen in allen vollkommen gleich ausfallen. So geschieht es denn, dass das Glühen des Drähtchens in einer Patrone einen etwas schwächeren Strom erfordert als in den anderen; diese Patrone wird zunächst entzündet, und wenn durch ihr Abbrennen die Leitung einmal unterbrochen ist, so bleiben die anderen in die gleiche Leitung eingeschalteten Minen unentzündet.

Lässt man dagegen durch eine Drahtleitung, in welcher mehrere Unterbrechungsstellen befindlich sind, eine elektrische Entladung durchschlagen, welche in Form von Funken durch die Lücken übergehen muss, so wird der Funken gleichzeitig an allen Unterbrechungsstellen auftreten.

Es ist deshalb der Methode der Glühzündung in diesem Falle die der Funkenzündung vorzuziehen. Den dazu nöthigen elektrischen Funken erhält man entweder, wie im §. 84 gezeigt wurde, durch eine Reibungselektrisirmaschine oder durch einen Funkeninductor. Siemens und Markus haben zu diesem Zwecke eigene Mineninductionsapparate construirt, deren Principien wir später kennen lernen werden. (Siehe auch A. von Waltenhofen, über elektrische Zündungen in grossen Entfernungen*).

233 **Der Inductionsfunken in verdünnten Gasen.** Im §. 86 haben wir bereits auf die Erscheinung des elektrischen Lichtes im verdünnten Raume aufmerksam gemacht und uns vorbehalten, auf diesen Gegenstand zurückzukommen, nachdem wir den Inductionsapparat kennen gelernt.

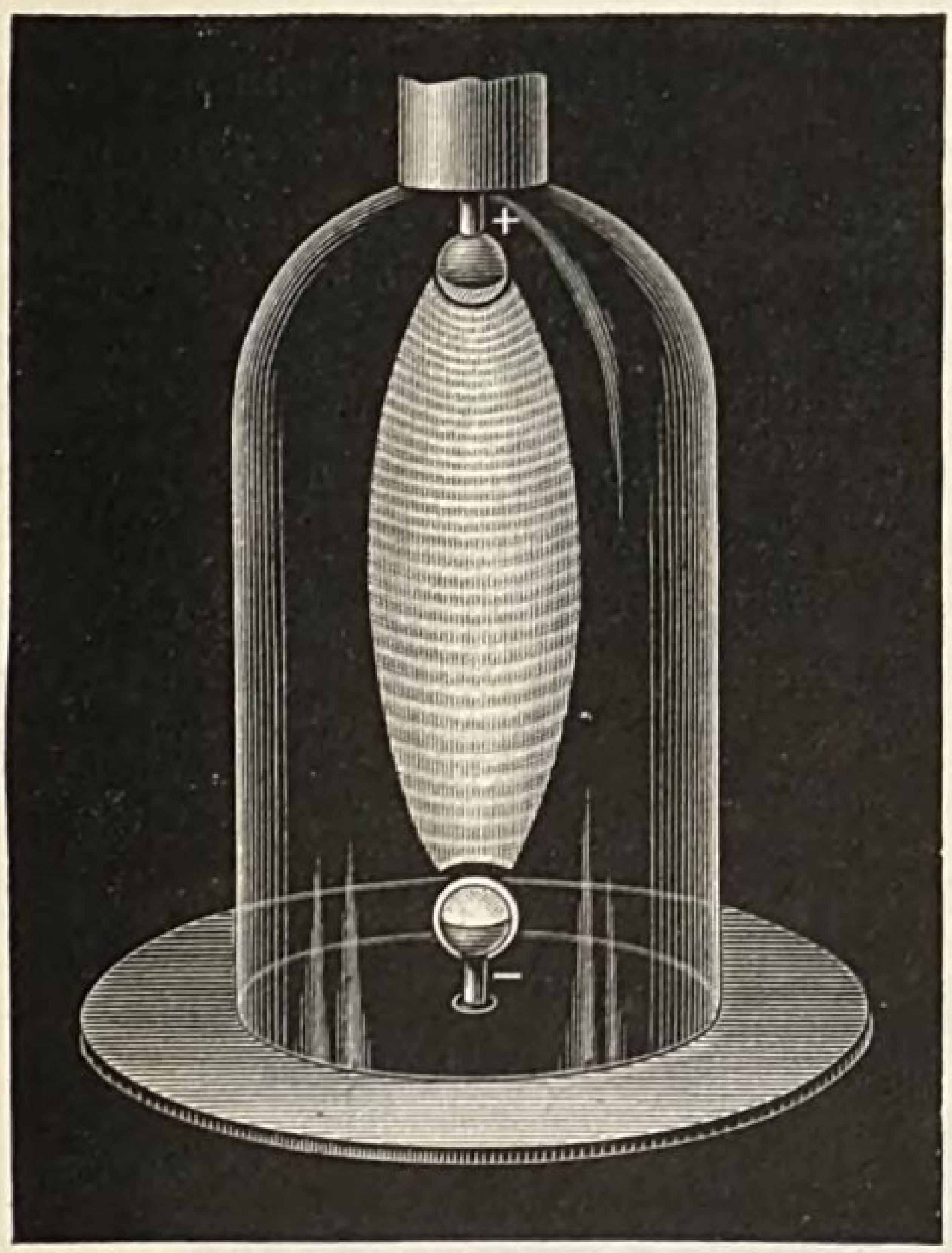
Die Literatur und das Beobachtungsmaterial über die Erscheinungen bei der elektrischen Entladung durch den gasverdünnten Raum ist in der letzteren Zeit sehr angeschwollen. Wir können davon hier nur das

*) Abhandl. d. k. böhm. Ges. d. W. VI, 8, 1876.

Wichtigste mittheilen, um so mehr, da wir bereits in der Optik das auf die Spectralanalyse des Funkenlichtes Bezügliche abgehandelt haben.

Um die prachtvolle Erscheinung zu beobachten, welche die Entladung des Funkeninductors durch den verdünnten Raum hervorbringt, kann man sich des oben §. 86 beschriebenen sogenannten elektrischen Eies oder auch einer Luftpumpenglocke bedienen, welche mit einer Stopfbüchse versehen ist, durch welche ein unten eine Kugel tragender Stab hindurchgeht; bei Anwendung einer solchen Glocke wird dann in die centrale Oeffnung des Luftpumpentellers ein kurzes Stäbchen eingesteckt, welches die untere Kugel trägt, wie dies Fig. 762 zu sehen ist. Der Luftpumpenteller wird mit dem einen, die Fassung der Glocke mit dem anderen Pole des Funkeninductors in leitende Verbindung gebracht. Von den beiden Kugeln, zwischen welchen die Elektricität übergehen soll, muss jeder Firnissüberzug entfernt sein.

Fig. 762.



Wenn so weit ausgepumpt ist, dass die Barometerprobe bis auf 1, höchstens 2 mm heruntergegangen ist und die positive Elektricität von der oberen Kugel zur unteren herabströmt, so beobachtet man die Erscheinung, wie sie Fig. 762 abgebildet ist. Die negative Kugel erscheint von einem tiefblauen Lichte eingehüllt, von der positiven Kugel aber strömt ein purpurrother Lichtschein aus, der beinahe bis zur negativen Kugel reicht und in welcher man eine schwarze Streifung wahrnimmt, welche besonders deutlich hervortritt, wenn man vor dem Auspumpen einige Tropfen Alkohol, Aether oder Terpentinöl in den Recipienten gebracht hatte. Auch mit der Influenzmaschine sind solche Erscheinungen zu erhalten, insbesondere, wenn man einen schlechten Leiter (nasse Schnur, mit Wasser gefüllte Glasröhre) einschaltet.

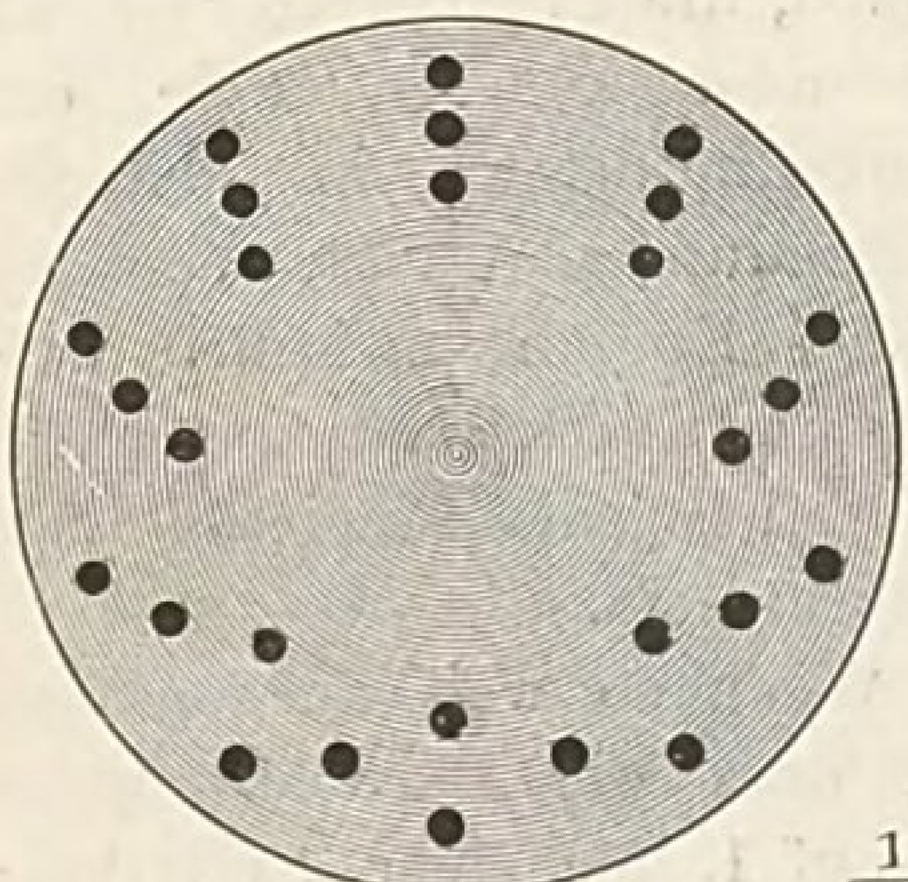
Diese Streifung beobachtet man selbst in dem Falle, dass die Lichterscheinung nur momentan durch eine einmalige Unterbrechung des Hauptstromes hervorgebracht wird.

Selbst kleinere Inductionsapparate reichen hin, um die eben beschriebene Lichterscheinung im leeren Raume hervorzubringen.

Das rothe Licht des positiven Poles ist von der blauen Hülle der negativen Kugel stets durch einen vollkommen dunkeln Zwischenraum getrennt.

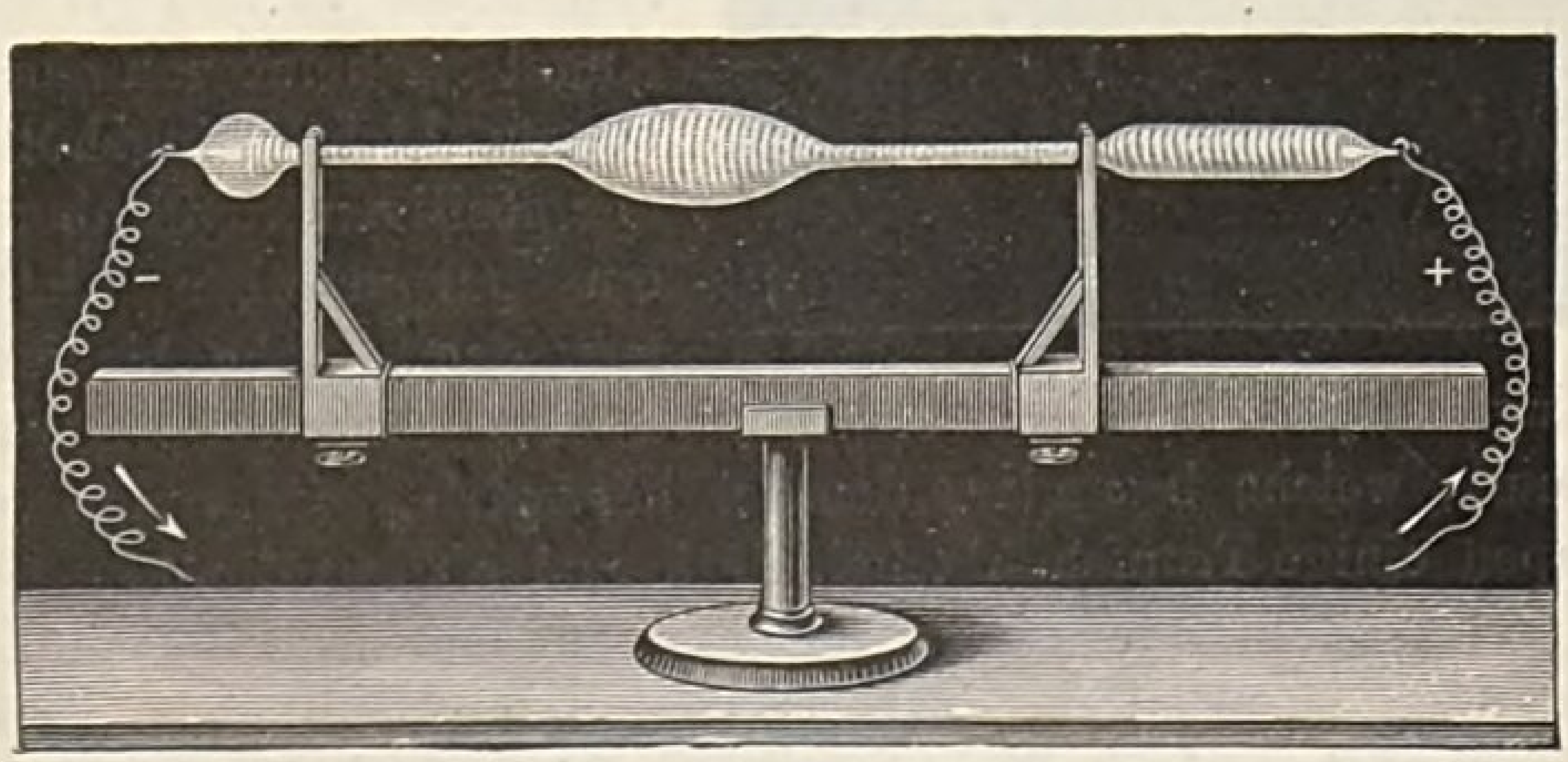
Obgleich man auf den ersten Anblick glauben könnte, dass ein continuirlicher Lichtstrom von dem positiven Pole ausgesendet wird, so kann man sich doch leicht davon überzeugen, dass dies nicht der Fall ist. Die Lichterscheinung tritt stossweise bei jeder Unterbrechung des Hauptstromes auf; bei der raschen Bewegung des Unterbrechers folgen aber diese Lichtblitze so rasch auf einander, dass man sie nicht mehr als einzelne unterscheiden kann. Dass die Sache sich in der That so verhält, geht unter anderem auch daraus hervor, dass, wenn man in der Nähe des durchströmten Recipienten irgend einen Gegenstand, etwa eine Hand, hin und her bewegt, man dieselbe vielfach zu sehen glaubt. Am schlagendsten hat es Poggendorff auf folgende Weise dargethan. Eine weisse Pappscheibe von ungefähr 20 cm Durchmesser ist in drei concentrischen Kreisen mit schwarzen runden Flecken bemalt, wie es Fig. 763 zeigt. Der äussere Kreis enthält deren 10, der mittlere 9, der innere 8. Dreht man nun die Scheibe mit langsam gesteigerter Schnelligkeit, so wird man bald dahin kommen, dass die Flecke des mittleren Kreises still zu stehen scheinen, während die des äusseren vorwärts, die des inneren rückwärts laufen. Diese Erscheinung muss offenbar eintreten, wenn die Scheibe während einer Vibration des Hammers gerade um 40° gedreht wird.

Fig. 763.



$\frac{1}{10}$

Fig. 764.



Um den leeren Raum nicht jedesmal mit Hülfe der Luftpumpe herstellen zu müssen und stets evacuirte Räume für den Versuch bereit zu haben, hat Geissler (und vor ihm schon Gassiot) evacuirte, zugeschmolzene Glasröhren hergestellt, in welchen sich verschiedene Gase in sehr verdünntem Zustande befinden und in welchen Platinelektroden ein- für allemal eingeschmolzen sind. Zur Herstellung dieser Röhren hat Geissler die bereits im ersten Bande besprochene Quecksilberluft-

pumpe construirt. Fig. 764 stellt eine solche Röhre mitsammt dem zur Aufstellung geeigneten Gestelle dar. Mit den Geissler'schen Röhren lassen sich mancherlei Versuche anstellen, zu denen das Vacuum in der Luftpumpenglocke nicht geeignet ist.

Auch hier zeigt sich das violette Glimmlicht am negativen Poldraht, während von dem positiven Poldraht ein Lichtstrom ausgeht, in welchem man die vorher besprochene Schichtung des elektrischen Lichtes meist in ausgezeichneter Weise beobachtet. Fig. 2 auf beigegebener Tafel ist eine möglichst getreue Abbildung dieser schönen Erscheinung, wie man sie in einer luft- oder stickstoffhaltigen Röhre beobachtet.

Die Farbe des vom positiven Pole ausgehenden Lichtstromes hängt von verschiedenen Umständen ab, und zwar zunächst davon, welches Gas in verdünntem Zustande die Röhre erfüllt; so ist sie z. B. bleichweissgrau in Röhren, welche Quecksilberdampf enthalten. Ferner hängt die Färbung des Lichtstromes von der Weite der Röhren ab; so erscheint z. B. der Lichtstrom in dem engen Theile einer mit verdünntem Wasserstoffgas gefüllten Röhre prachtvoll purpurroth, während er in dem weiteren Theile der Röhre von blassblaugrüner Färbung erscheint.

Endlich hängt die Färbung des Lichtstromes auch von der Intensität des Stromes ab, welcher durch das verdünnte Gas entladen wird; die intensiv purpurrothe Färbung, welche man in dem engen Theile der Wasserstoffröhre beobachtet, wenn man kräftige Inductionsströme anwendet, wird matter und mehr orangeroth für schwächere Ströme und blassbläulich, wenn man die Funken vom Conductor der Elektrisirmaschine durchschlagen lässt.

Bei fortgesetztem Durchleiten des Stromes in derselben Richtung bedeckt sich bald die Glaswand, welche die negative Elektrode umgiebt, mit einem metallischen Anflug, während die Elektrode selbst rauh und corrodirt erscheint. Die Farbe des Anflugs entspricht der des fein vertheilten Metalles der Elektrode; er ist bläulich bei Silber, schwärzlich bei einer Platinelektrode. — Eine negative Elektrode von Aluminium scheint verhältnissmässig wenig corrodirt zu werden.

Man hat früher das Leuchten des verdünnten Gases durch die Annahme zu erklären gesucht, dass die Gasmolekeln durch den elektrischen Strom bis zur Glühhitze erwärmt werden. Durch die calorimetrischen Messungen von E. Wiedemann, dem wir die eingehendsten Untersuchungen der einschlägigen Erscheinungen verdanken*), ist jedoch erwiesen worden, dass die Gase schon bei Temperaturen, die merklich unter 100° (bis zu 60° herab) betragen, leuchten können. Es muss daher angenommen werden, dass die elektrischen Entladungen direct auf den Lichtäther einwirken.

*) Wiedem. Ann. V, S. 500 (1878); VI, S. 298 (1879).

Im Bande II, 1, haben wir von der starken Fluorescenzwirkung des Lichtes des elektrischen Funkens gesprochen. Um dieselbe zu zeigen, kann man in der Weise verfahren, dass man auf den Teller der Luftpumpe zunächst ein Stück Drahtnetz legt und auf dieses einen Becher von Uranglas setzt, wie Fig. 765 zeigt. Der durch die Stopfbüchse herabgehende, unten mit einer isolirenden Glasröhre umgebene Messingstab wird dann so weit herabgeschoben, dass die Kugel, welche er trägt, auf dem Boden des Becherglases aufsitzt. Wenn man nun, nachdem die Glocke gehörig evacuirt ist, den Körper der Luftpumpe mit dem negativen, den Messingstab *m* mit dem positiven Pol des Inductors in Verbindung setzt, so strömt das purpurne Licht in Form einer Cascade über den Rand des Glases, welches im Gegensatz zu diesem rothen Feuerstrom im herrlichsten grünen Lichte strahlt.

Um die Fluorescenz an anderen Körpern, z. B. an Edelsteinen, bequem zu zeigen, kann man sich der von Crookes angegebenen Vorrichtung Fig. 766 bedienen. Das mit sehr verdünnter Luft gefüllte zugeschmolzene Glasgefäss enthält eine Anzahl von Edelsteinen. Bei *N* und *P* sind Elektroden eingeschmolzen. Verbindet man dieselben mit den Polen eines Funkeninductors, so erglänzen die Edelsteine in prachtvollen Farben. Rubine strahlen dabei ein herrlich rothes Licht aus, welches im Spectroskop eine ausgeprägte Linie nahe bei der Fraunhofer'schen Linie *B* erkennen lässt; Phenakit (Beryllerde-Silicat) leuchtet blau, Spodumen (Thonerde- und Lithion-Silicat) goldgelb, Smaragd carmoisinroth, Diamant grün, Schwefelcalcium (künstlich dargestellter Leuchtstein) blauweiss etc.

Fig. 765.

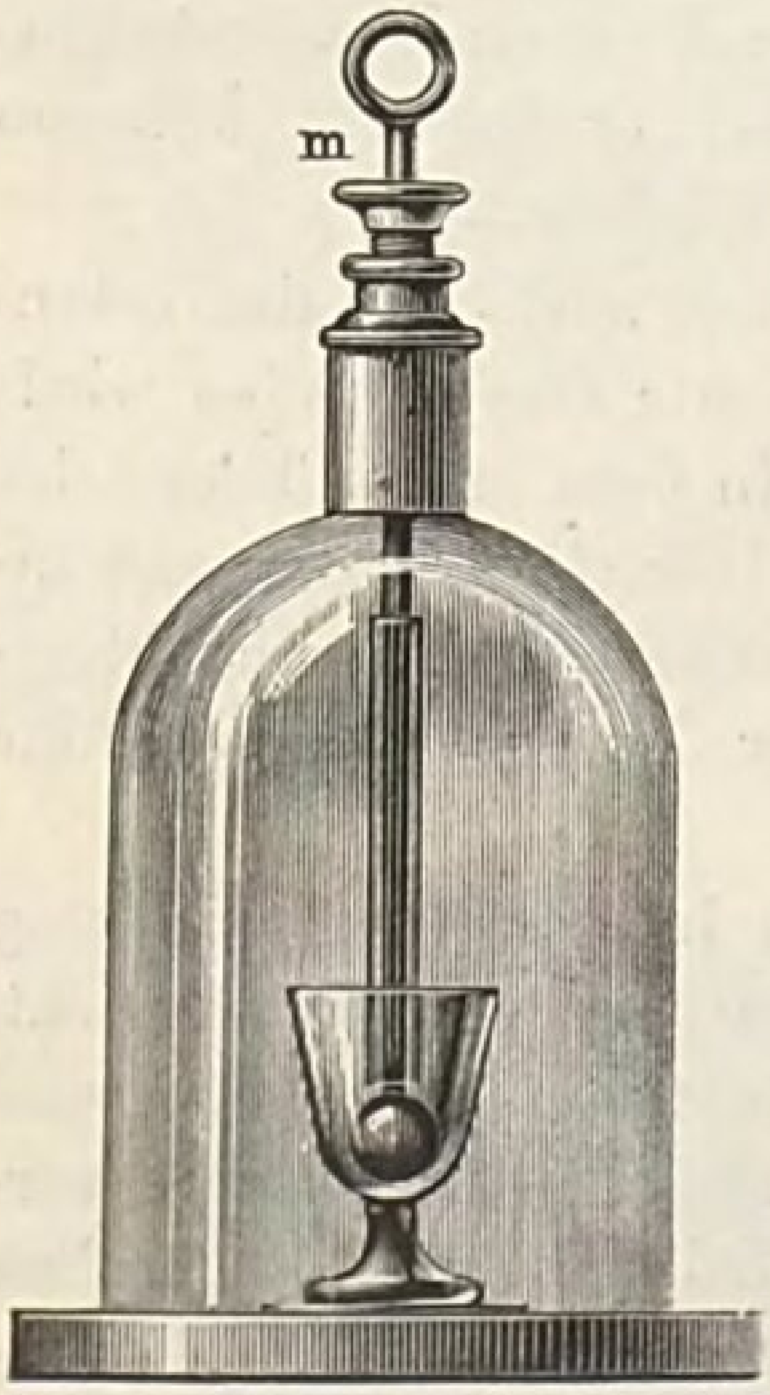
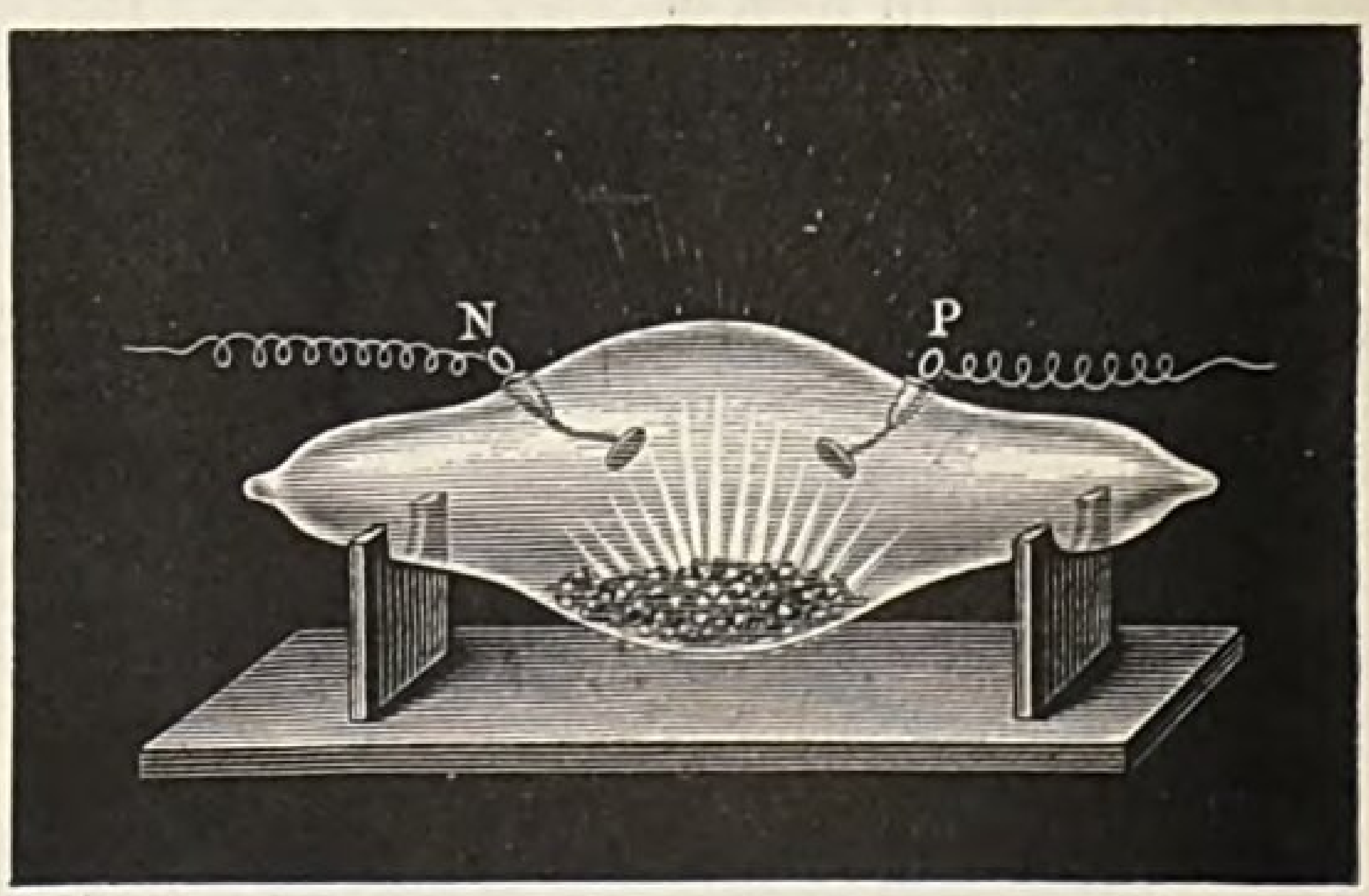


Fig. 766.



Eine artige Spielerei wird auf die Weise zu Stande gebracht, dass man eine aus fluorescirendem Glase hergestellte Geissler'sche Röhre mittelst eines elektromagnetischen Motors um eine auf der Mitte der Röhrenaxe senkrecht angebrachte horizontal liegende Axe rotiren lässt. Derselbe Strom, der diesen elektromagnetischen Motor betreibt, liefert

dann bei den Unterbrechungen des Commutators auch den Inductionsstrom, welcher, durch die Geissler'sche Röhre sich entladend, dieselbe mit Fluorescenzlicht erleuchtet. Man erhält so einen schönen leuchtenden Stern, welcher unter dem Namen Gassiot'scher Stern bekannt ist.

Hittorf's und Crookes' Versuche mit elektrischen Entladungen in sehr stark verdünnten Gasen. W. Hittorf hat im Jahre 1869 in einer wichtigen Abhandlung „Ueber die Elektricitätsleitung in Gasen" *) eine Anzahl von Phänomenen beschrieben, welche sich bei der Entladung von Inductionsfunken durch Glasgefässe zeigen, deren Luft man über die gewöhnlich erreichbaren Verdünnungsgrade hinaus verdünnt hat. Der englische Physiker Crookes hat dann später unabhängig im Wesentlichen die nämlichen Beobachtungen gemacht und für dieselben eine eigenthümliche Hypothese aufgestellt, welche auf der Annahme eines vierten Aggregatzustandes beruht. Die in diesem Zustande befindlichen Körper nannte er, einer älteren Ausdrucksweise Faraday's folgend, „strahlende Materie", da sie gewisse Eigenschaften und Bewegungsgesetze zu besitzen schien, welche an die Licht- und Wärmestrahlen erinnern. Diese Hypothese von Crookes wurde lange von den Physikern bekämpft; später ist man aber wieder zu ihr zurückgekehrt, wenn auch in modificirter Form. 234

Wir haben oben erwähnt, dass die negative Elektrode in einer mit verdünnter Luft erfüllten Geissler'schen Röhre zunächst von einem schmalen hellen Saume, dann von einem relativ dunkeln bläulichen Raume (Glimmlicht) umgeben sei, während die Umgebung der positiven Elektrode und der grösste Theil des Zwischenraumes mit Schichten hellen, rothgelben Lichtes erfüllt wird. Treibt man nun aber die Verdünnung so weit, bis der Druck unter 2 mm gesunken ist, und steigert sie dann noch weiter, so breitet sich das bläuliche Glimmlicht immer weiter aus und erfüllt unter Umständen das ganze Innere der Röhre.

E. Wiedemann**), welcher übrigens seine Versuche mit der Influenzmaschine unter Einschaltung von Widerständen anstellte, giebt von der Erscheinung, wie sie sich bei Anwendung von plattenförmigen Elektroden darstellt, die in Fig. 767 (a. f. S.) wiedergegebene Abbildung und folgende Beschreibung: „Ist *k* eine Kathode, so lagert sich um diese eine von Licht fast entblösste Partie, welche wir dunklen Kathodenraum nennen; an sie schliesst sich eine nach der Kathode scharf begrenzte Schicht *b*, die helle Kathodenschicht. Nach der Anode zu geht von ihr ein immer verwaschener werdendes Licht *bp*, wir nennen dieses Glimmlichtstrahlen. Diese sind von der positiven geschichteten Lichtsäule, deren erste Schicht *p* sei, durch einen dunklen Raum *hp*,

*) Pogg. Ann. CXXXVI, S. 1 u. 197.

**) Wiedem. Ann. XX, S. 756 (1883).

den Trennungsraum, geschieden. Das Ganze wird von den von der Kathode k ausgehenden Kathodenstrahlen lm durchsetzt."

Wo die Glimmlichtstrahlen das Glas treffen, tritt lebhafte Fluorescenz desselben ein. Das Merkwürdigste ist aber der Umstand, dass dieses Licht von der Elektrode aus sich nur geradlinig ausbreitet und nicht, wie sonst der Inductionsfunke zu thun pflegt, um Ecken herum geht und allen Krümmungen der Röhre folgt. Jeder in die Richtung des Glimmlichtes gestellte Körper begrenzt dasselbe und erzeugt dadurch einen Schatten auf der Glaswand.

Fig. 767.

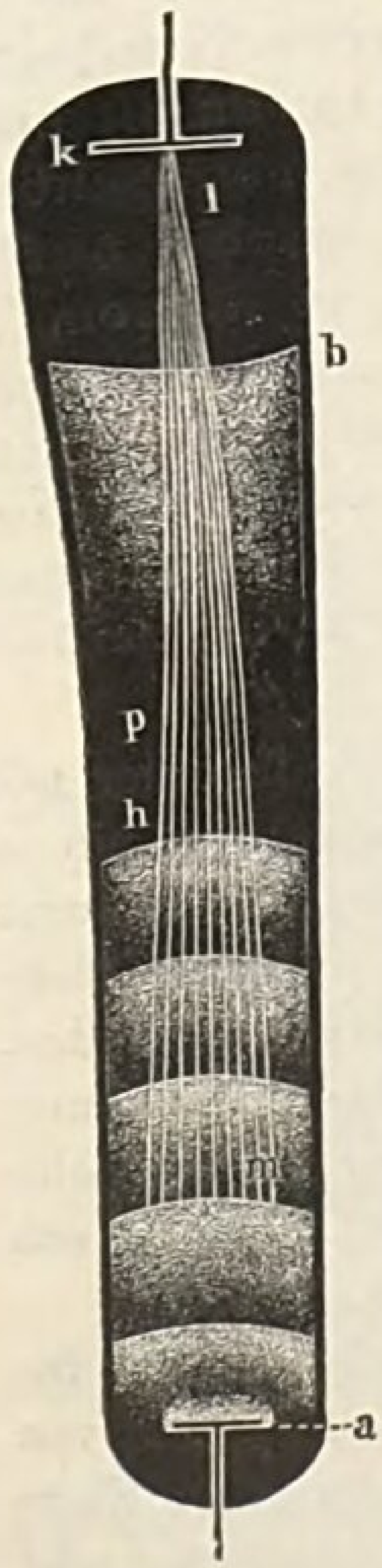


Fig. 768.

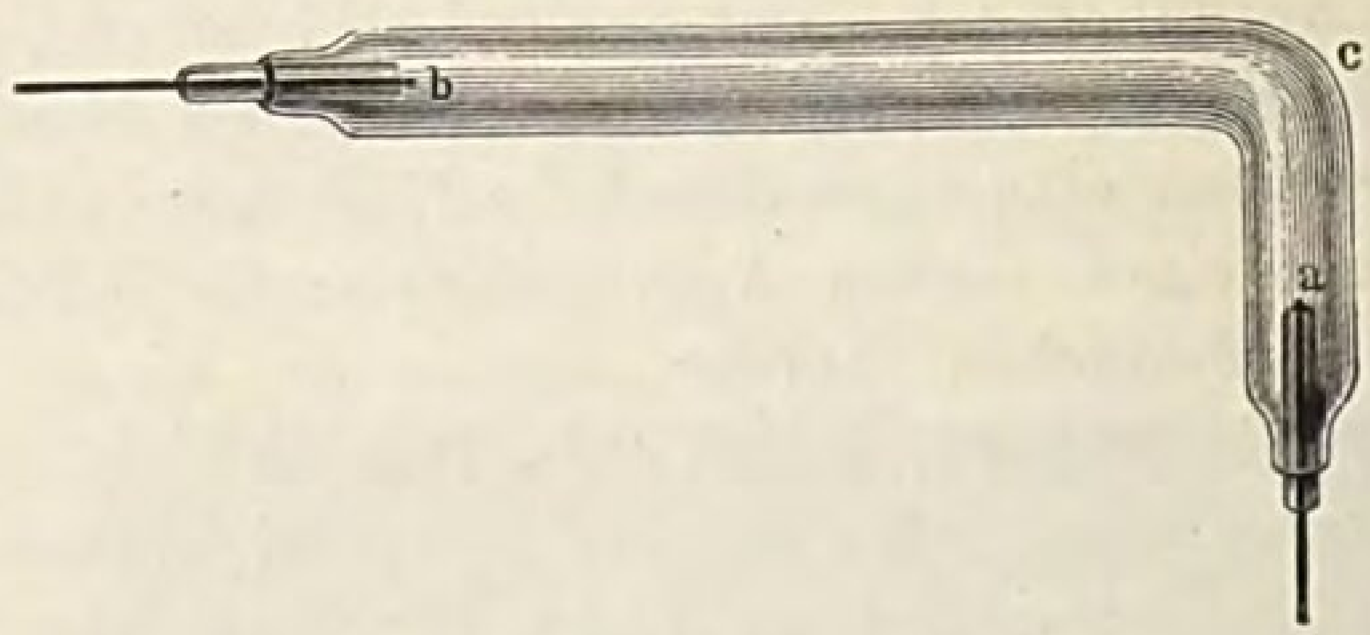
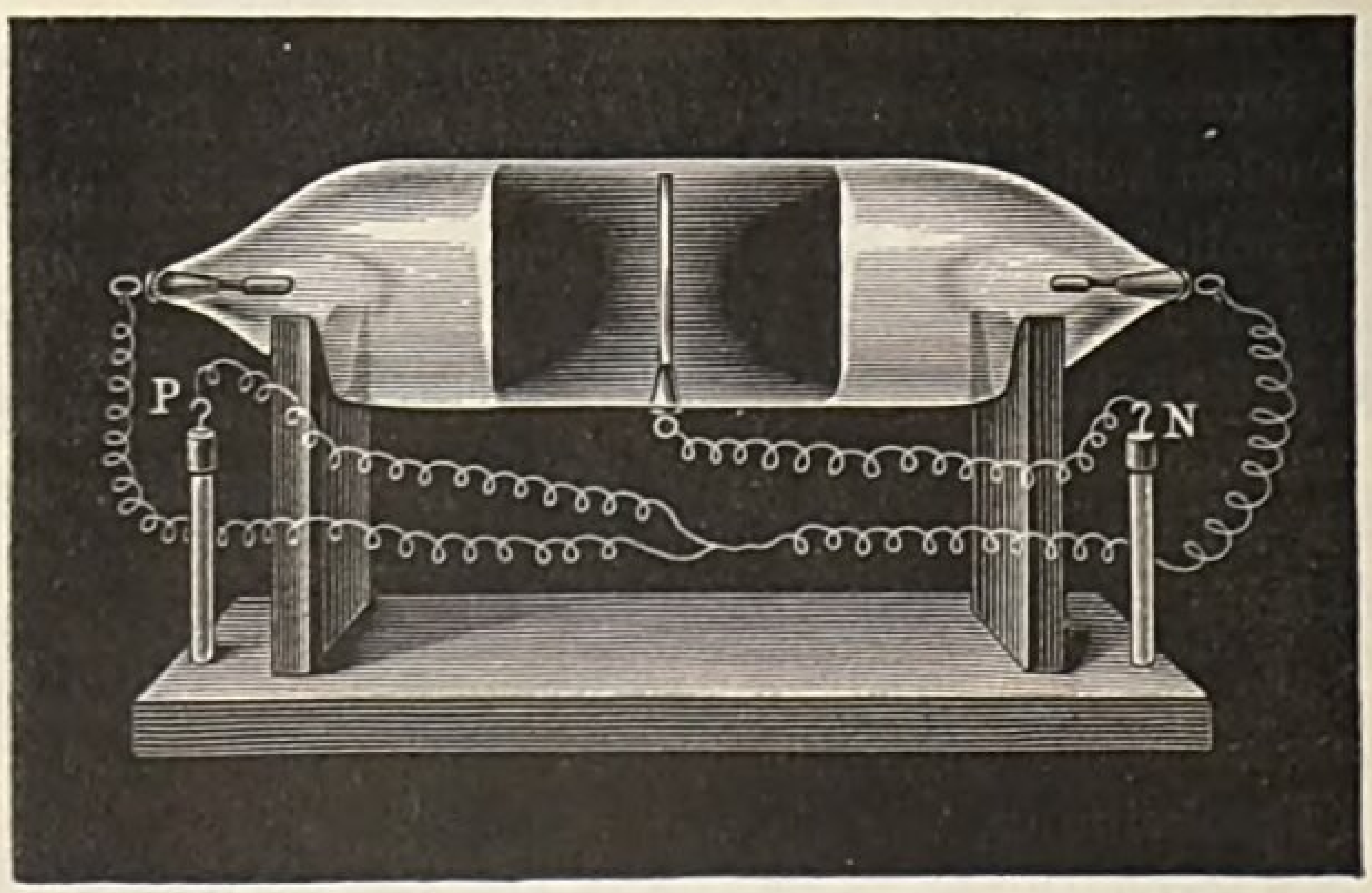


Fig. 769.

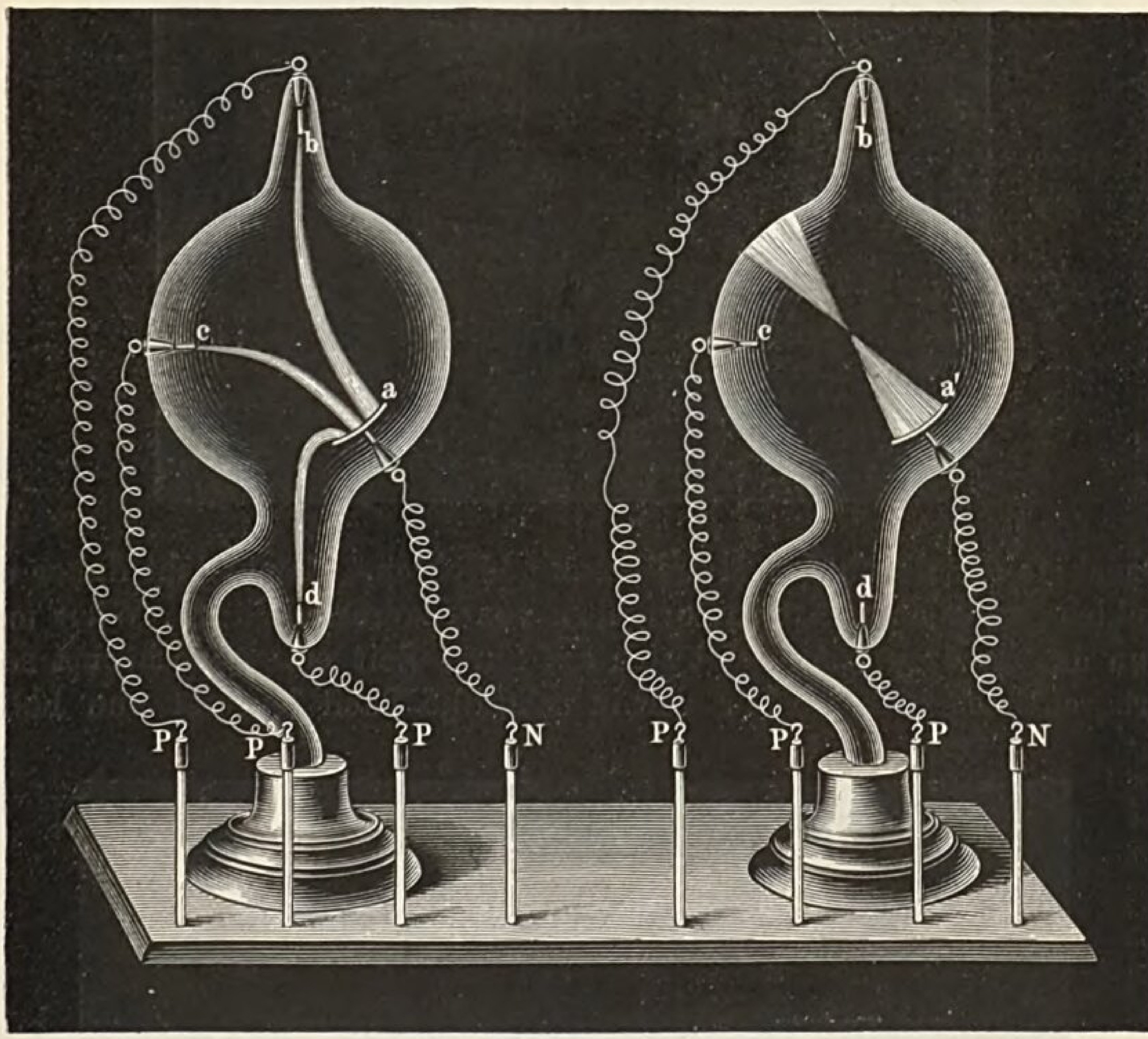


Hittorf hat diese Eigenthümlichkeit des negativen Glimmlichtes mittelst des Apparates Fig. 768 nachgewiesen. bca ist ein rechtwinklig gebogenes Glasrohr mit Elektroden an den Enden a und b. Bei geringen Verdünnungen, bei welchen das Glimmlicht nur geringe Ausdehnung hat, geht der Funke einfach um die Ecke herum von der einen Elektrode zur anderen. Hat aber bei stärkerer Verdünnung das Glimmlicht sich weiter ausgebreitet und ist a die negative Elektrode, so gehen die Strahlen des Glimmlichtes von a nur bis c, stossen daselbst an und erleuchten daselbst das Glas im Fluorescenzlicht.

Ist *b* die negative Elektrode, so geht das Glimmlicht höchstens bis *c*, nie biegt es um die Ecke. Crookes hat das Verhalten des Glimmlichtes durch folgende Experimente gezeigt:

In Fig. 769 ist eine Röhre abgebildet, welche in der Mitte eine negative Elektrode in Form einer Aluminiumscheibe, an beiden Enden positive Elektroden der gewöhnlichen Form besitzt. Sie zeigt, wenn sehr stark evacuirt, wie sich der dunkle Raum auf beiden Seiten von der negativen Elektrode eine Strecke weit ausbreitet. Je verdünnter die Luft ist, desto weiter erstreckt sich dieser Raum.

A Fig. 770. B

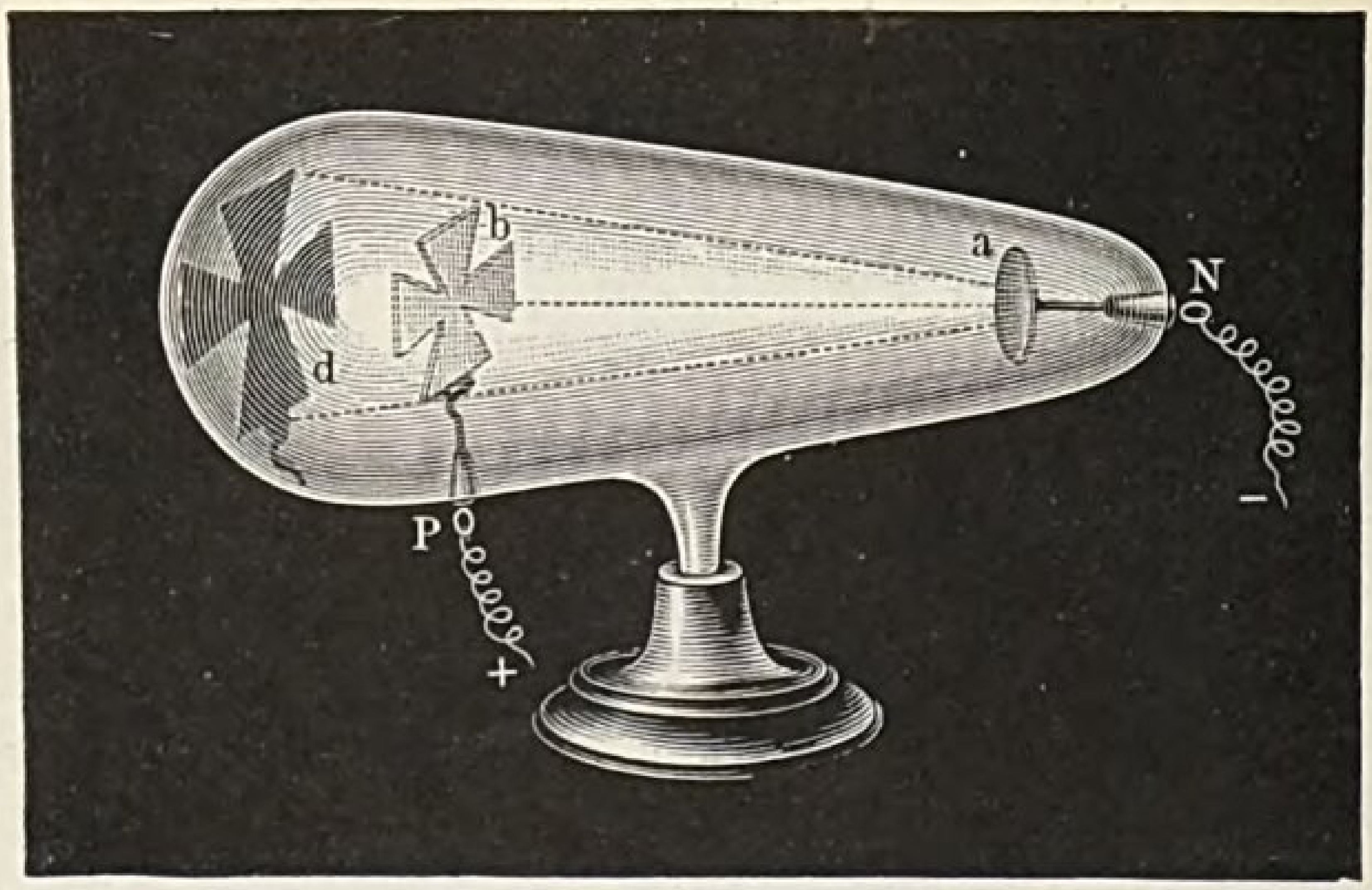


Die Apparate Fig. 770 dienen zur Demonstration der geradlinigen Ausbreitung. Fig. 770 *A* zeigt die Erscheinung in einem Glasgefässe, in welchem die Verdünnung noch nicht weiter als bis 2 mm Druck getrieben ist. Verbindet man den negativen Pol des Inductionsapparates mit der Elektrode *a*, welche die Form eines kleinen Hohlspiegels hat, und dann der Reihe nach den positiven Pol mit der Elektrode in *b*, *c* oder *d*, so geht der Funkenstrom in krummen Bahnen durch den Raum. Hat man aber die Verdünnung bis auf ein Milliontel Atmosphäre (nach Crookes) getrieben, so stellt sich die in *B* abgebildete Erscheinung ein. Wird nämlich wieder die Elektrode *a'* mit dem negativen Pole verbunden, so kann man den positiven Pol an *b*, *c* oder *d* ansetzen, es zeigt sich stets

dasselbe; die Strahlen des Glimmlichtes gehen von der schalenförmigen Elektrode senkrecht aus, kreuzen sich in einem Focus und treffen die gegenüberstehende Glaswand, wo sie Fluorescenzlicht hervorrufen.

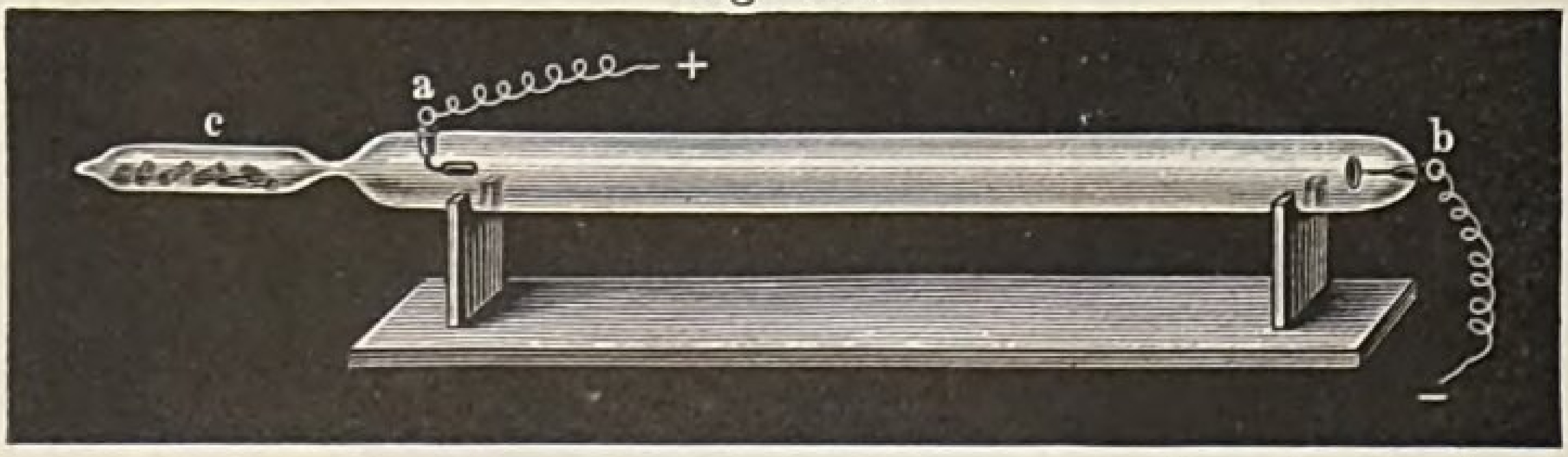
Fig. 771 zeigt einen Apparat zur Demonstration des Schattens des Glimmlichtes. *a* ist wiederum die negative Elektrode, als positive dient ein aus Aluminiumblech ausgeschnittenes Kreuz, welches mittelst Scharnier so befestigt ist, dass es sich aufstellen und umwerfen lässt. Das Glimmlicht geht geradlinig aus, trifft die Glaswände an allen Stellen mit

Fig. 771.



Ausnahme der durch das Metallkreuz gedeckten. Es entsteht daher ein dunkles Kreuz als Schatten, umgeben von Fluorescenzlicht. Wirft man dann das Kreuz um, so zeigt sich auf kurze Zeit eine neue höchst sonderbare Erscheinung. Der vorhin schattige Theil leuchtet nun heller

Fig. 772.

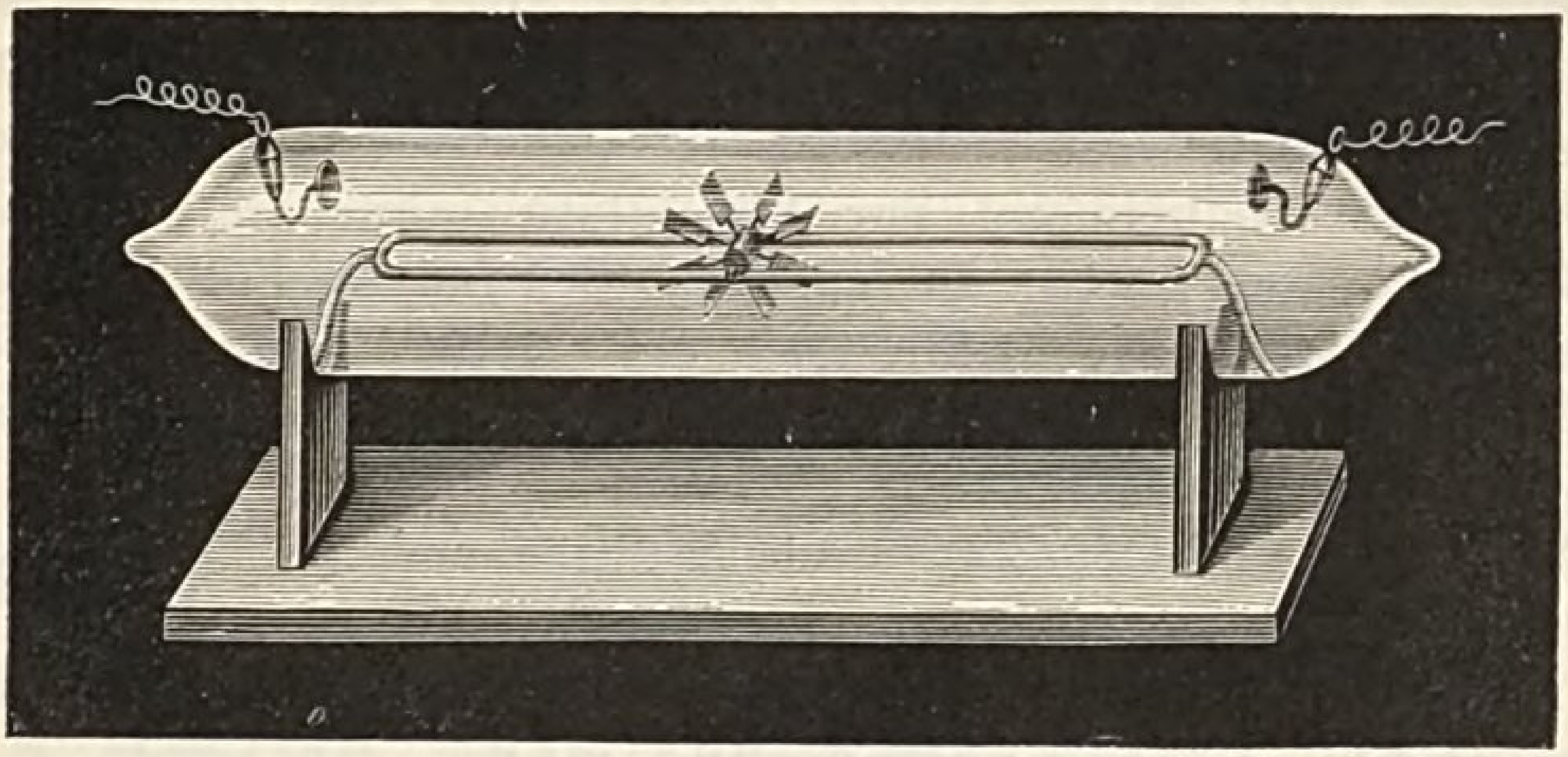


als die Umgebung, so dass ein helles Kreuz auf weniger hellem Grunde sichtbar wird. Das fluorescirende Glas verhält sich also gewissermaassen wie die Retina des Auges, welche in Folge von Ermüdung zu Contrastbildern Anlass giebt.

Um die Wirkung einer allmäligen Zunahme oder Abnahme des Verdünnungsgrades zu demonstriren, hat Crookes den Apparat Fig. 772 construirt. Er besteht aus einer Glasröhre, in welche bei *a* und *b* Elektroden eingeschmolzen sind. *c* ist ein Ansatz, welcher einige Stücke kaustisches Kali enthält. Durch anhaltendes Evacuiren, während das Kali erhitzt wurde, hat man einen möglichst luftleeren Raum hergestellt.

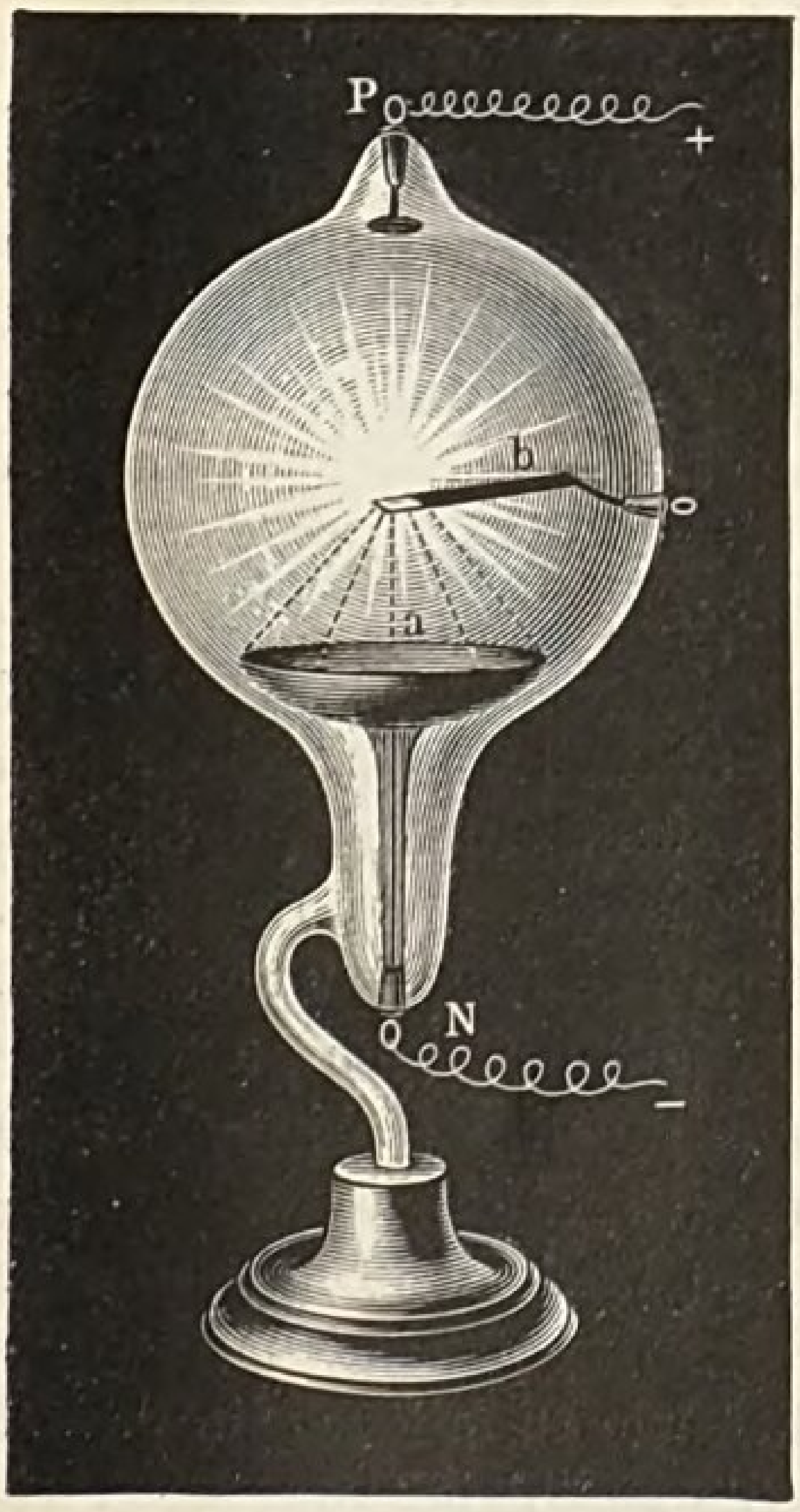
Die letzte Spur Wasserdampf wird dann beim Erkalten des geschmolzenen Kalihydrats von diesem absorbirt. Die so weit entleerte Röhre lässt nun den Inductionsfunken gar nicht mehr hindurch.

Fig. 773.



Erwärmt man dann wiederum das Kalihydrat, so wird eine Spur absorbirten Wasserdampfes frei und sofort beginnt die Leitung der Elektricität und in Folge dessen das Fluorescenzleuchten der Röhre. Entwickelt man durch stärkeres Erwärmen etwas mehr Wasserdampf, so wird das Fluorescenzlicht schwächer, und plötzlich eilt eine Welle wolkigen Lichtes durch die Röhre, es erscheinen die charakteristischen Schichtungen, welche rasch dichter werden, bis der Funke längs der Röhre in Gestalt einer schmalen Purpurlinie hinläuft. Lässt man nun das Aetzkali wieder erkalten und den Wasserdampf absorbiren, so verbreitert sich die Purpurlinie, löst sich dann in feine Schichtungen auf, welche sich erweitern und gegen die Kaliröhre hinziehen. Hierauf erscheint am anderen Ende eine Welle grünen Lichtes am Glase, welche die letzte blasse Schichtung wegfegt und gegen das Kali treibt, worauf die ganze Röhre in Fluorescenzlicht erglimmt.

Fig. 774.



Dass das ausstrahlende Glimmlicht der negativen Elektrode leichte Körper, auf die es auftrifft, in Bewegung zu setzen vermag, hat Crookes mittelst des Apparates Fig. 773 gezeigt. Auf der gläsernen Schienenbahn rollt die Axe eines kleinen Rades, dessen Speichen Schaufeln aus Glimmer tragen. An den Enden der Röhre oberhalb der Mitte sind zwei

Aluminiumelektroden eingeschmolzen. Sobald man dieselben mit den Polen des Inductionsapparates verbindet, wirkt die Entladung auf die obere Hälfte des Rades und setzt dasselbe gegen die positive Elektrode in Bewegung.

Endlich hat Crookes mittelst des Apparates Fig. 774 (a. v. S.) nachgewiesen, dass dort, wo die Strahlen des Glimmlichtes auffallen, Wärme entsteht. Vereinigt man viele solche Strahlen in einem Focus, so kann man daselbst Iridiumplatin zur Weissgluth erhitzen, ja sogar zum Schmelzen bringen. *a* ist die negative Elektrode in Form eines Hohlspiegels, *P* die positive Elektrode, *b* ein Streifen Platinblech, welches zur Weissgluth erhitzt wird, wenn man einen hinreichend starken Inductionsapparat anwendet.

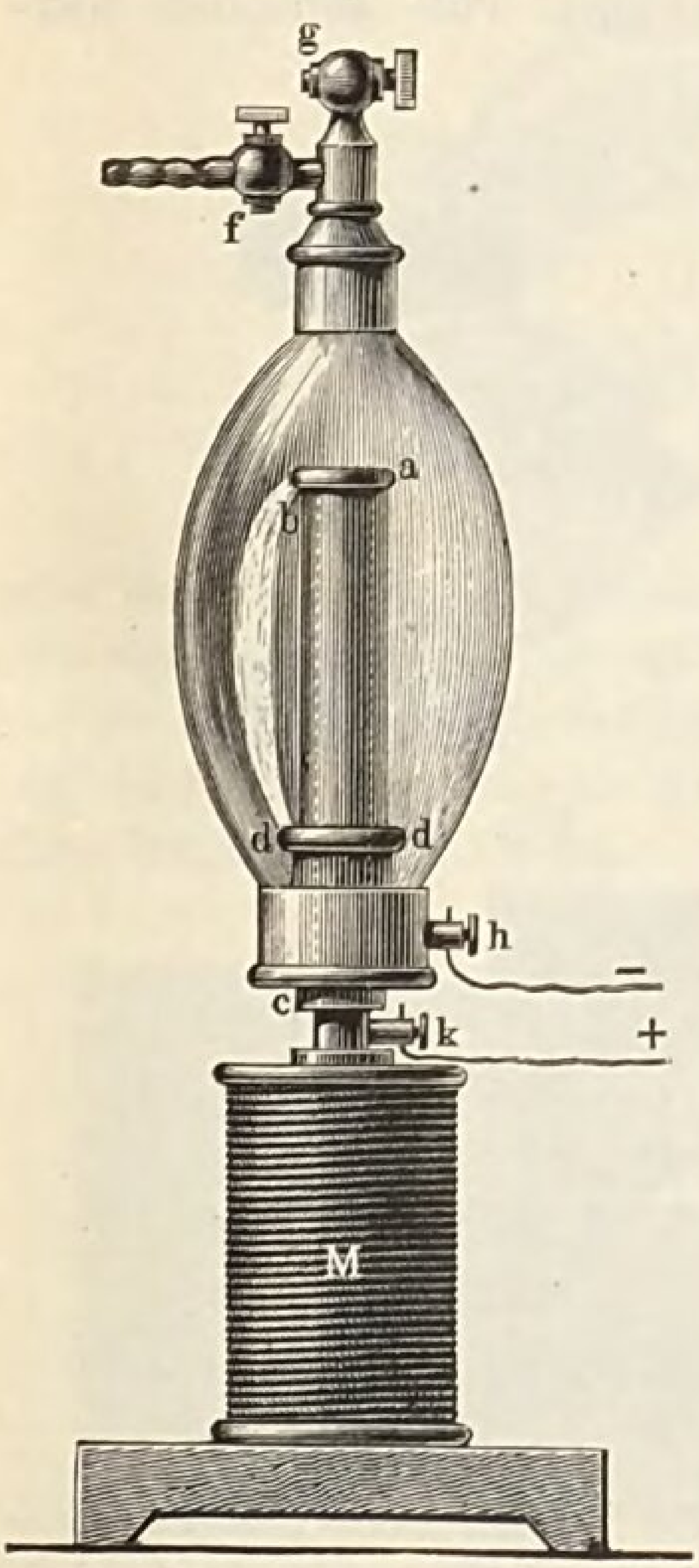
Hittorf's und Crookes' Beobachtungen und des Letzteren Hypothese über die Existenz „strahlender Materie" haben eine grosse Reihe von Untersuchungen von Seiten anderer Physiker (Plücker, Goldstein, Gintl, Puluj, Voller, Rühlmann, Hertz, G. Wiedemann und insbesondere E. Wiedemann) hervorgerufen. Dieselben haben ein überreiches Material von interessanten Thatsachen, aber keine erschöpfende Erklärung oder abschliessende Theorie geliefert. Ein Versuch von Gintl und Puluj, die Kathodenstrahlen durch geradlinig fortgeschleuderte materielle Theilchen der Kathode zu erklären und deren Wärmewirkung auf die lebendige Kraft des Stosses zurückzuführen, scheitert nach E. Wiedemann insbesondere an den unmöglichen Werthen für die Geschwindigkeit, welche man annehmen müsste, um die übertragene Energiemenge möglich zu machen. E. Wiedemann hält die Kathodenstrahlen für Lichtstrahlen mit sehr kleiner Schwingungsdauer. Wir müssen dieserhalb auf die Originalabhandlungen verweisen.

235 **Einwirkung des Magnets auf die elektrische Entladung in verdünnten Gasen.** Auf den gewöhnlichen Lichtstrom in den Geissler'schen Röhren wirkt der Magnetismus ganz nach denselben Gesetzen, wie auf bewegliche Stromleiter überhaupt. Wenn man z. B. eine Röhre von der Form Fig. 764, S. 880, in äquatorialer Richtung (d. h. so, dass die Axe der Röhre rechtwinklig steht auf der durch die Verbindungslinie der beiden Pole des Elektromagnets gelegten Verticalebene) mit ihrem ellipsoidisch erweiterten mittleren Theil zwischen die genäherten Halbanker des Elektromagnets bringt, so wird der Lichtstrom je nach seiner Richtung und der Polarität des Elektromagnets entweder nach oben oder nach unten abgelenkt, ähnlich wie es mit der im §. 232 besprochenen Lichthülle des Inductionsfunkens geschieht.

Unter entsprechenden Umständen rotirt der im verdünnten Raum übergehende Lichtstrom des Inductionsapparates eben so um einen Magnetpol, wie dies auch beim galvanischen Flammenbogen oder irgend einem anderen beweglichen Leiter der Fall ist.

Es lässt sich dies sehr schön mit dem von De la Rive angegebenen Apparat Fig. 775 zeigen. Der Eisenkern des Elektromagnets *M* ist durch einen ungefähr 2 cm dicken, oben eine überragende Platte *a* tragenden Eisenstab verlängert, welcher in einer wohl isolirenden Glasröhre *bc* steckt. Der ganze obere Theil dieses von Glas umgebenen Eisenstabes befindet sich nun im Inneren eines elektrischen Eies, mit dessen unterer Messingfassung der die Glasröhre umfassende Messingwulst *dd* in leitender Verbindung steht. Die obere Fassung des elektrischen Eies ist mit zwei Hähnen versehen. Durch den Hahn *f* kann das elektrische Ei mit einer Luftpumpe in Verbindung gesetzt werden, durch den Hahn *g*, dessen Einrichtung dem Hahn Fig. 148, S. 170, ähnlich ist, kann man einige Tropfen Alkohol oder Aether in das Innere des Eies bringen.

Fig. 775.



Wenn man, nachdem das Ei evacuirt ist, die auf dem Eisenkern sitzende Klemmschraube *k* mit der positiven, die auf der unteren Messingfassung befestigte Klemmschraube *h* mit der negativen Elektrode des Funkeninductors in leitende Verbindung setzt, so geht eine mehr oder weniger unregelmässige Lichtgarbe von der Platte *a* zum Messingring *dd* herab; sobald man aber den Elektromagnet in Thätigkeit setzt, concentrirt sich das Licht zu einem hellen Bande, welches um den nun magnetischen Eisenkern rotirt.

Die Richtung der Rotation folgt den bekannten Gesetzen; sie wird umgekehrt, wenn man entweder die Polarität des Elektromagnets oder die Stromrichtung des Inductionsapparates umkehrt.

Einen sehr bequemen Apparat zur Hervorbringung dieser Rotation, welcher ein- für allemal evacuirt ist, hat Geissler construirt. In ein ringsum verschlossenes Gefäss, Fig. 776 (a. f. S.), sind Platindrähte *a* und *d* luftdicht eingeschmolzen, von denen der untere einen im Inneren des evacuirten Gefässes befindlichen, kreisförmig gebogenen Messingdraht *m* trägt, während an dem unteren Ende des Zuleitungsdrahtes *a* eine kleine Messingplatte befestigt ist. Der obere Zuleitungsdraht ist bis auf dieses Messingplättchen, der untere ist bis zum Ringe *m* ganz mit einer isolirenden Glashülle umgeben. Von unten her ragt in den evacuirten Raum eine oben geschlossene Glasröhre *H* hinein, in welche ein Stab von weichem Eisen eingekittet

ist. Dieser Eisenstab reicht bis zur unteren Fläche des Holzfusses hinab, welcher den ganzen Apparat trägt, er wird also zu einem Magnet, wenn der Apparat auf den Pol eines kräftigen Elektromagnets aufgesetzt wird. Man hat also nur die Drähte *a* und *d* mit den Drahtenden der Inductionsspirale zu verbinden, um die fragliche Rotationserscheinung zu beobachten.

Ganz anders verhält sich, wie schon Plücker*) gezeigt hat, das Glimmlicht der negativen Elektrode. Unter dem Einflusse eines kräftigen Elektromagnets wird dasselbe zu einer Fläche ausgebreitet, welche durch die Gesammtheit aller durch die einzelnen Punkte der negativen Elektrode und die beiden magnetischen Pole gehenden magnetischen Curven gebildet wird.

Fig. 776.

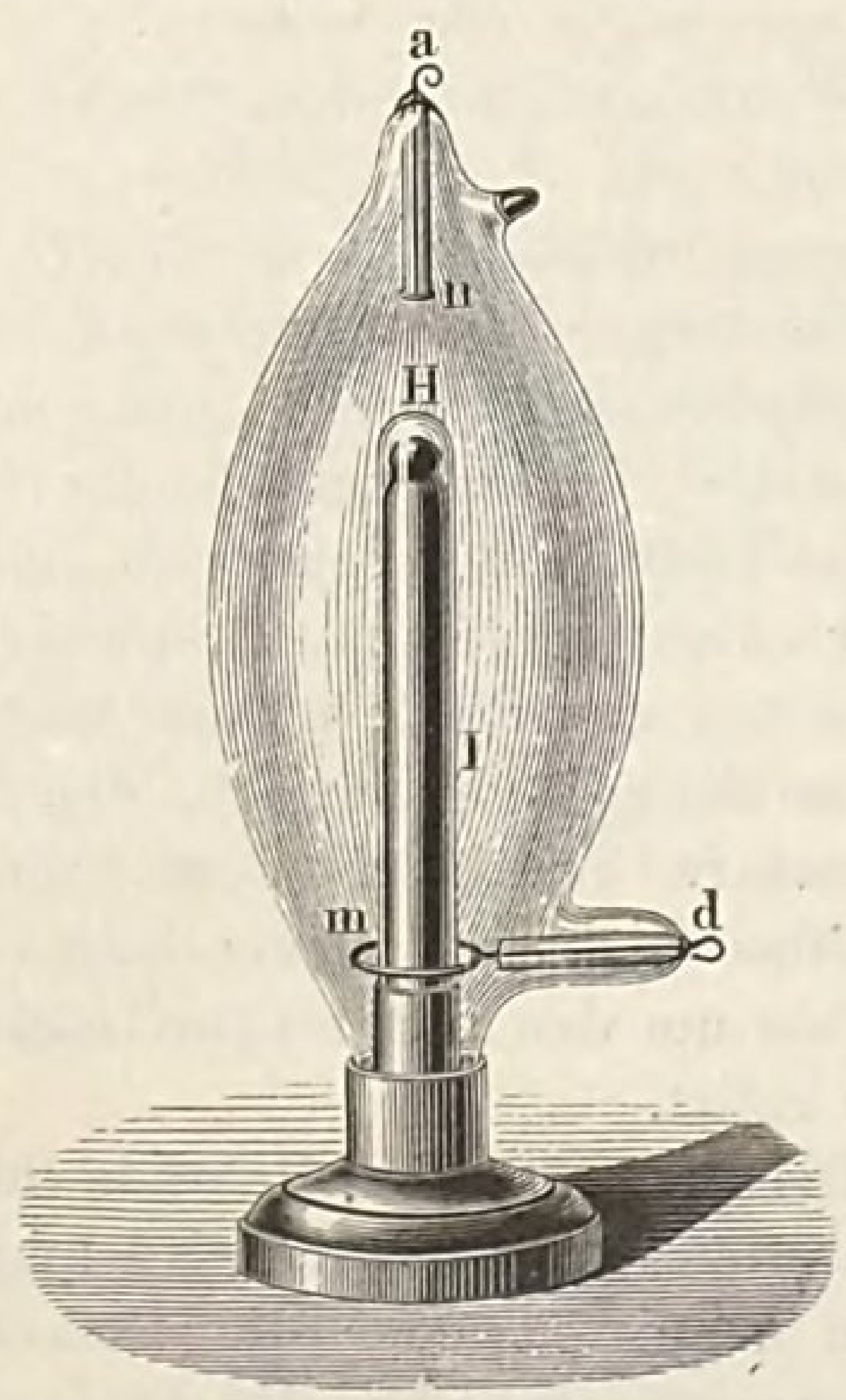


Fig. 777.

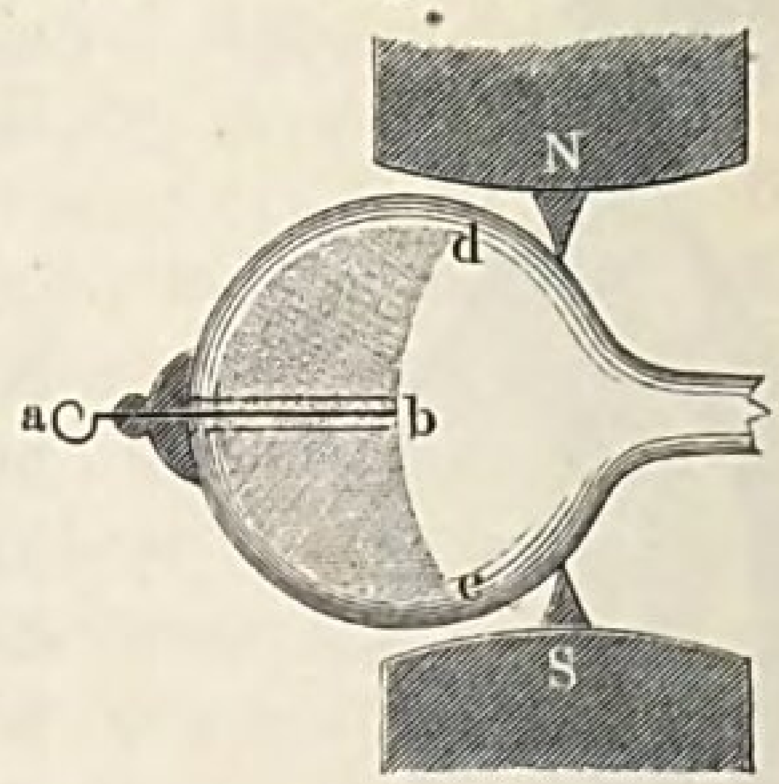
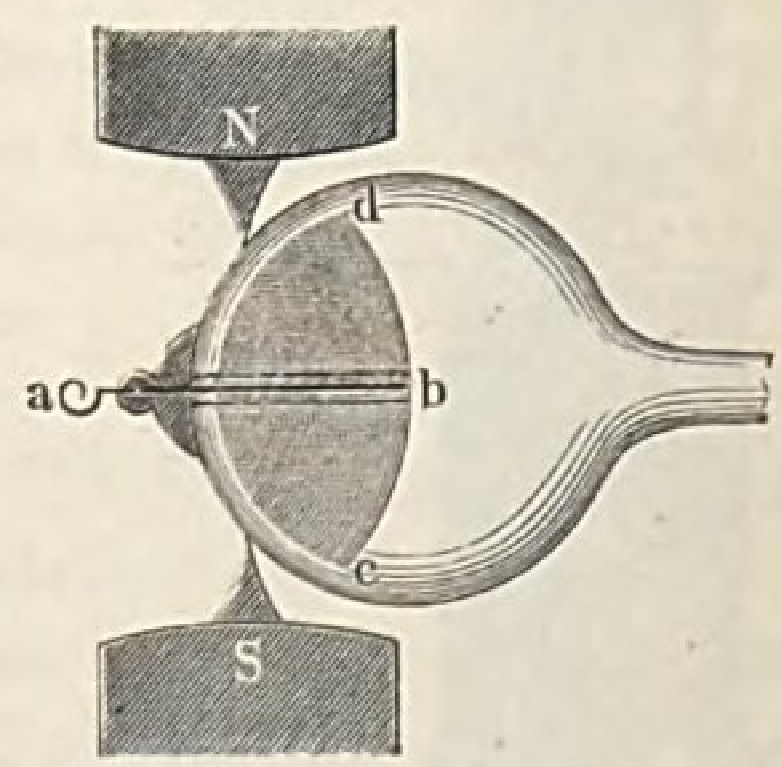


Fig. 778.



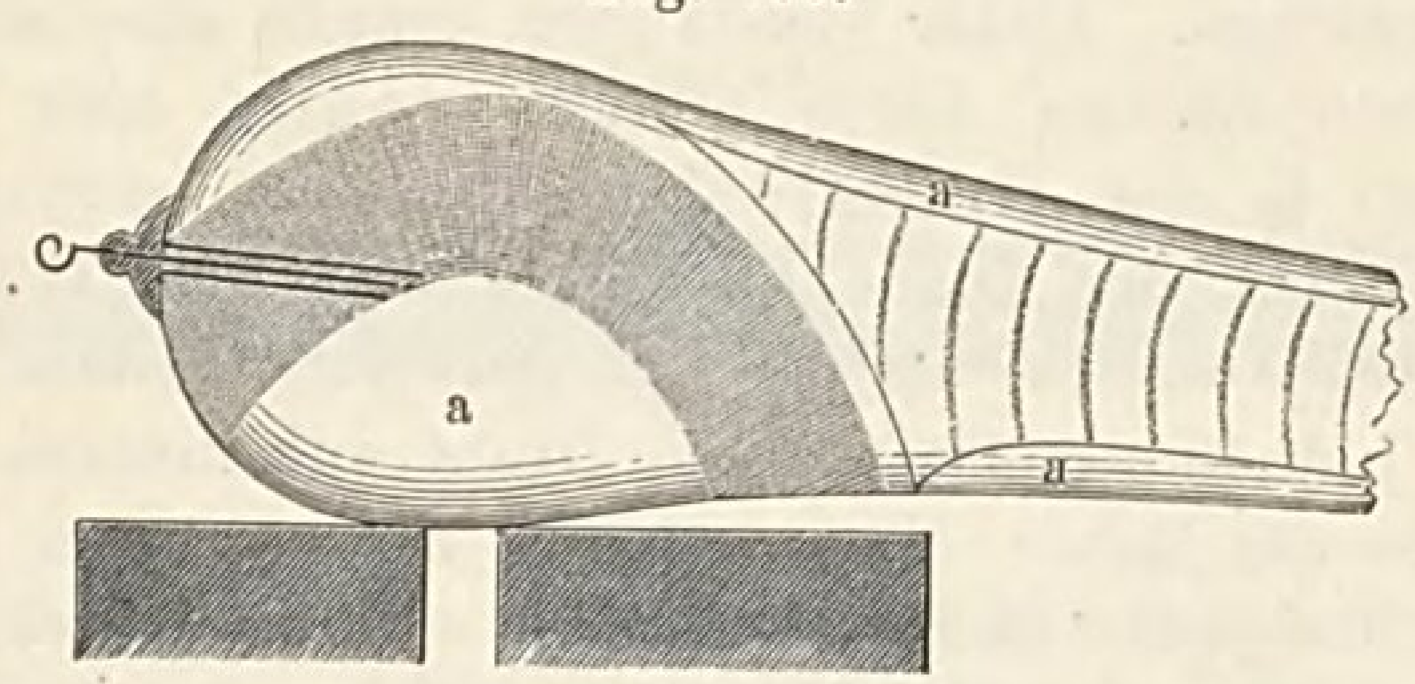
In Fig. 777 und 778 seien *N* und *S* die beiden Pole des Elektromagnets, zwischen welche eine Geissler'sche Röhre so gelegt wird, dass die negative Elektrode *ab* in gleicher Höhe mit den Magnetpolen liegt. Es bildet dann das blaue Glimmlicht eine horizontale Fläche, welche in unseren Figuren durch Schraffirung angedeutet ist. Die durch den Endpunkt *b* der negativen Elektrode gelegte magnetische Curve *cbd* bildet die Grenzlinie der Lichtfläche.

Wird die Geissler'sche Röhre in axialer Lage auf die Halbanker des Elektromagnets aufgelegt, so nimmt die Fläche, in welcher das blaue Licht ausgebreitet wird, die in Fig. 779 angedeutete Gestalt an.

*) Pogg. Ann. CIII.

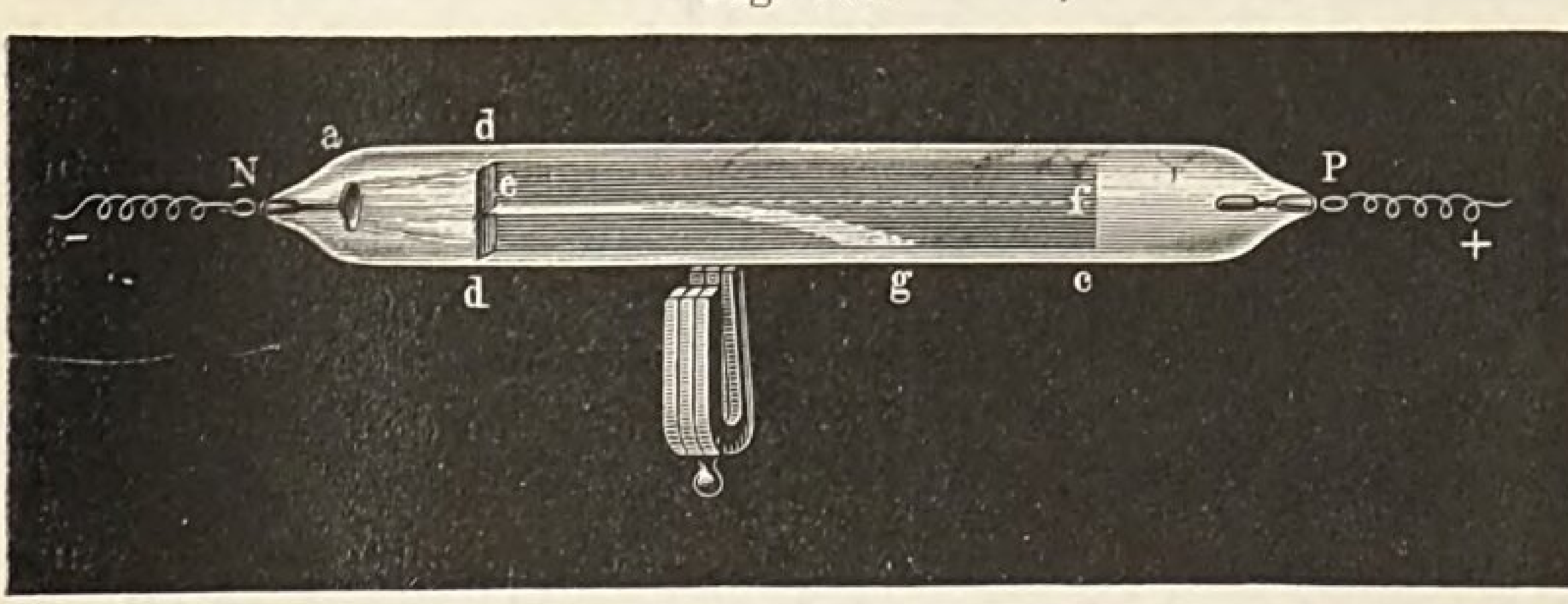
Viel eingehender wurde die Einwirkung des Magneten auf das Glimmlicht von Hittorf und später von Crookes studirt. Das Hauptresultat ist nach Hittorf folgendes: Ein Strahl Glimmlicht verhält sich dem Magnet gegenüber wie ein dünner, geradliniger, gewichtsloser, steifer Stromfaden, der bloss an dem Ende, welches der negativen Elektrode anliegt, fest bleibt. Mit seinem anderen Ende und der ganzen biegsamen Länge folgt er den Kräften, welche zwischen seinen Theilchen und dem Magnete bestehen, ohne Rücksicht darauf, welche Lage er in Bezug auf die positive Elektrode gewinnt, ob er sich dabei von ihr entfernt

Fig. 779.



oder ihr nähert. Das positive Licht dagegen unterhält die Verbindung zwischen dem Glimmlicht und der positiven Elektrode; es erscheint daher als ein auf der ganzen Länge biegsamer Leiter, dessen Enden beide fest sind und kann nur so weit den magnetischen Kräften folgen, als es diese Bedingung gestattet.

Fig. 780.



So lange die Verdünnung nicht sehr gross ist, erfüllt das positive Licht fast die ganze Länge zwischen den Elektroden. Durch den Magnet erfährt dasselbe nur dort eine Ausbiegung, wo derselbe genähert wird. Bei sehr grosser Verdünnung erfüllt das negative Glimmlicht die Röhre und dieses verhält sich anders. Crookes zeigte dies mittelst des Apparates Fig. 780. Durch ein Diaphragma aus Glimmer *dd* mit einer Oeffnung *e* wird das von der negativen Elektrode ausgehende Glimmlicht auf ein schmales Strahlenbündel *cf* begrenzt, dessen Verlauf dadurch sichtbar gemacht wird, dass man es längs des Schirmes *ddf* aus einer fluorescirenden Substanz streifend auffallen lässt. Durch einen

kräftigen Magnet erfolgt dann die Ablenkung wie die Figur zeigt. Crookes hat in ähnlicher Weise auch nachgewiesen, dass zwei parallele Glimmlichtbündel sich gegenseitig abstossen, also nicht wie zwei gleich gerichtete Ströme, sondern wie gleichnamig elektrisirte Körper auf einander wirken.

236 **Alternirende Entladungen in Geissler'schen Röhren.** Alle bis jetzt besprochenen Lichterscheinungen in Geissler'schen Röhren rühren von einfach gerichteten Strömen her, weil nur der Oeffnungsschlag Intensität genug besitzt, eine Entladung durch die Röhre hindurch zu bewirken. Unter Umständen können aber auch abwechselnd gerichtete Ströme (auch alternirende oder recurrente Ströme genannt) in den Geissler'schen Röhren auftreten, so z. B., wenn man zwischen der Inductionsspirale und dem Geissler'schen Rohr eine Leydener Flasche in der Art einschaltet, dass man von dem einen Pol der Inductionsspirale einen Draht zur inneren und von der einen Elektrode der Röhre einen solchen zur äusseren Belegung der Flasche führt. Bei jedem Oeffnungsschlage wird die Flasche geladen und die abgestossene Elektricität der äusseren Belegung gleicht sich durch die Röhre mit der Elektricität des anderen Poldrahtes aus. Bevor nun aber die Wiederschliessung des Hauptstromes erfolgt, entladet sich die Flasche wieder durch den Inductionsdraht und die Röhre hindurch, so dass letztere nun in einer dem Ladungsstrome entgegengesetzten Richtung durchströmt wird.

Dass hier in der That die Röhre von abwechselnd gerichteten Strömen durchflossen wird, ergiebt sich zunächst daraus, dass nun an beiden Elektroden das negative Glimmlicht auftritt, dann aber auch besonders deutlich dadurch, dass man den rothen Lichtstrom in den Röhren der Einwirkung eines kräftigen Elektromagnets aussetzt, denn der aus rasch auf einander folgenden, entgegengesetzt gerichteten Strömen zusammengesetzte rothe Lichtstreifen wird dadurch in zwei getrennte Lichtstreifen zerlegt, welche durch den Einfluss des Magnets in verschiedener Weise abgelenkt werden.

Dieses Prüfungsmittel wandte nun Paalzow zur Untersuchung des Entladungsschlages der Leydener Batterie an *). Als er in den Schliessungsbogen einer einzelnen Flasche oder einer ganzen Batterie, welche durch die Elektrisirmaschine geladen wurde, eine Geissler'sche Röhre einschaltete, zeigte sich, als derselbe der Einwirkung eines Elektromagnets ausgesetzt wurde, dass die durch dieselbe hindurchgehende Entladung in der That aus alternirend gerichteten Strömen bestand, wenn ausser der Röhre kein weiterer bedeutender Widerstand in den Schliessungsbogen der Flasche eingeschaltet war; durch die Einschaltung eines hinlänglich starken Widerstandes aber wurde die Entladung eine einfach

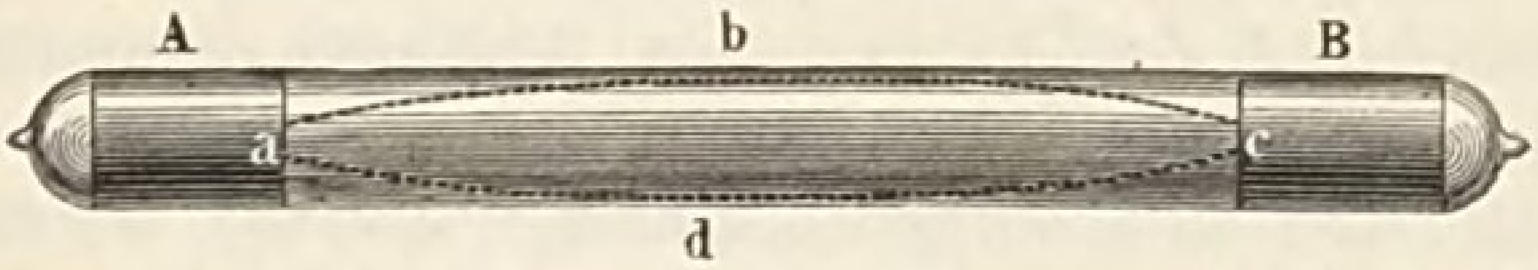
*) Pogg. Ann. CXII.

gerichtete. Dadurch ist nun auch die Richtigkeit der Resultate bestätigt, welche Feddersen aus den im §. 88 besprochenen Versuchen mit dem rotirenden Spiegel gezogen hat.

Gassiot versah eine evacuirte Glasröhre, in welche keine Platinelektroden eingeschmolzen waren, an jedem Ende mit einer Stanniolbelegung, wie es in Fig. 781 angedeutet ist.

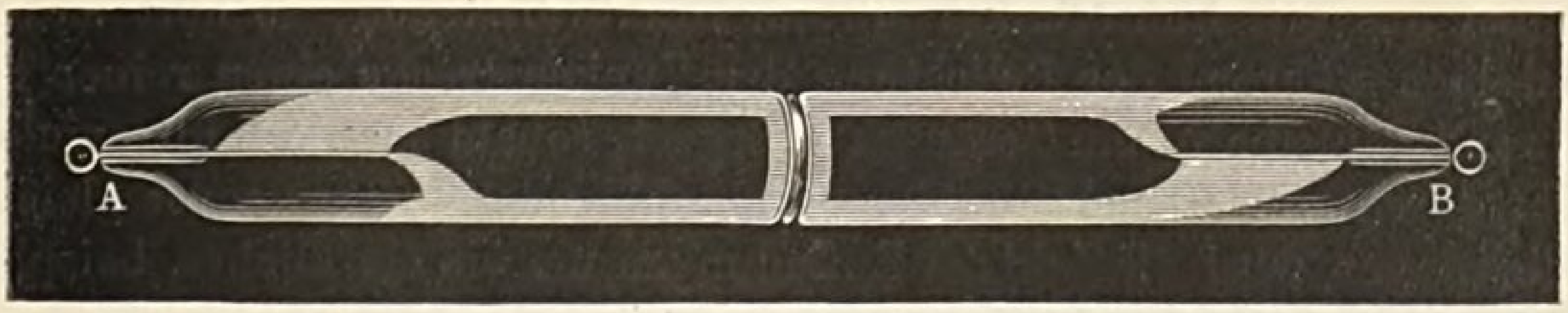
Als jede dieser Belegungen mit einem der Pole des Funkeninductors verbunden und dieser in Thätigkeit gesetzt wurde, bildete sich ein Lichtstrom im Inneren der Röhre, welcher durch die Einwirkung des Elektromagnets in zwei zerlegt wurde. Als sich die Röhre in der bereits im

Fig. 781.



§. 235 besprochenen Weise in äquatorialer Richtung zwischen den Polen des Elektromagnets befand, wurde der eine Strom nach oben gekrümmt, wie *abc*, der andere aber nach unten, also nach der Richtung *adc* abgelenkt. Die Entstehung alternirender Ströme in der Röhre erklärt sich folgenderweise: In dem Augenblick, in welchem die eine Belegung, etwa *A*, durch den Oeffnungsstrom des Inductors mit positiver Elektricität geladen wird, wird die positive Elektricität im Inneren der Röhre von *A* nach *B* strömen; wenn aber gleich darauf die Belegung *A* durch den Schliessungsstrom des Inductors mit negativer Elektricität

Fig. 782.



geladen wird, so muss ein positiver Strom im Inneren der Röhre von *B* nach *A* laufen.

Recurrirende Ströme treten auch in Geissler'schen Röhren auf, welche in der Mitte durch eine dünne Scheidewand von Glas getheilt sind. In äquatorialer Lage zwischen die Pole des Elektromagnets gebracht, zeigt ein solches Rohr in beiden Hälften einen doppelten Lichtstreifen, indem der Lichtstrom z. B. von der einen Elektrode *A*, Fig. 782, sich nach unten senkt, bis zur Scheidewand fortgeht, wo er sich nach oben wendet, um auf der oberen Seite des Rohres nach *A* zurückzukehren. In der anderen Hälfte des Rohres nimmt der Strom die entgegengesetzte Richtung. Beide Pole zeigen das negative Glimmlicht.

237 **Einwirkung des Lichtes auf die elektrischen Entladungen.** Eine interessante Entdeckung wurde jüngst von H. Hertz*) gemacht, indem er beobachtete, dass das Ueberschlagen des elektrischen Funkens an einem Inductionsapparate dadurch erleichtert wird, dass man die negative Elektrode derselben durch das Licht einer zweiten Funkenstrecke beleuchtet. Entfernt man die Kugeln, zwischen denen die Funken überschlagen, so weit, dass eben keine Entladungen mehr stattfinden, so treten dieselben sofort wieder auf, wenn man in der Nähe einen Inductionsfunken hervorruft, dessen Licht die negative Elektrode treffen kann. Dieselbe Wirkung hat aber auch das Licht einer elektrischen Bogenlampe, des brennenden Magnesiums und im geringeren Grade jedes Licht, welches ultraviolette Strahlen sehr kurzer Wellenlänge enthält. Dagegen ist das Licht grösserer Wellenlänge unwirksam. Aus diesem Grunde erlischt die Wirkung, wenn man zwischen die Funkenstrecke und die Lichtquelle ein Medium bringt, welches, wie Glas, Glimmer, Leuchtgas, die ultravioletten Strahlen absorbirt**), wogegen z. B. Marienglas (Gyps) und Bergkrystall die Wirkung hindurch lassen, da sie für diese Strahlen durchsichtig sind.

Diese Beobachtungen wurden von anderen Physikern bestätigt und erweitert. E. Wiedemann und H. Ebert***), welche ihre Versuche mit der Influenzmaschine anstellten, zeigten, dass nicht allein die Entladung der Elektricität durch die Bestrahlung mit dem Lichte erleichtert wird, sondern dass dieselbe auch ihren Charakter ändert. In einer miteingeschalteten Geissler'schen Röhre wird bei Beleuchtung der Funkenstrecke die Entwickelung des Anoden- und Kathodenlichtes eine regelmässige normale, wie sie sonst ohne Einschaltung einer Funkenstrecke stattfindet. Schaltet man ein Telephon in die Leitung ein, dessen Windungen aus mit Kautschuk isolirtem Drahte bestehen, so hört man in demselben während der Belichtung der Funkenstrecke einen reinen Ton, während derselbe in ein Geräusch übergeht, sobald man das ultraviolette Licht durch eine Glasplatte oder dergl. abblendet. Unter sonst gleichen Bedingungen wird die Zahl der Entladungen um ein Merkliches, beispielsweise um $^1/_3$, vergrössert.

Die Wirkung des Lichtes beschränkt sich ausschliesslich auf die negative Elektrode; sie ist in Luft am stärksten bei einem Drucke von 30 bis 40 cm Quecksilber, nimmt bei Vergrösserung des Druckes ab, noch rascher bei Verminderung desselben. Unter 5,8 cm Druck ist kein Einfluss mehr bemerkbar. Ueberhaupt erlischt der Einfluss, wenn die Versuchsbedingungen von vornherein der Entwickelung von Kathodenstrahlen günstig sind. Die Wirkung ist bei kugelförmigen Elektroden

*) Wiedem. Ann. XXXI, S. 983 (1887).

**) Bei Anwendung von Kohlensäure zeigten sich auch die brechbareren der sichtbaren Strahlen wirksam.

***) Wiedem. Ann. XXXIII, S. 241; XXXV, S. 209 (1888).

grösser als bei spitzen. Auch das Material der Elektroden ist dabei von Einfluss. Bei Platin macht sich der Einfluss des Lichtes viel stärker geltend als bei den übrigen Metallen, was der grösseren Absorptionsfähigkeit desselben für ultraviolette Strahlen zugeschrieben wird. Zink und Kupfer erfahren viel schwächere Wirkung, Eisen, Aluminium, Silber eine sehr geringe. Verwendet man als negative Elektrode die Kuppe einer Flüssigkeit, so erfahren alle gefärbten, stark absorbirenden Flüssigkeiten eine starke, reines Wasser eine geringe Wirkung. Am stärksten erschien die Wirkung auf Nigrosinlösung.

Damit im Zusammenhange steht wohl auch der Einfluss, welchen verschiedene Flammen auf den Durchgang elektrischer Entladungen ausüben. Nach *Wiedemann* und *Ebert* setzen anwesende Metalldämpfe die zum Uebergange der Elektricität nöthige Spannung bedeutend herab, insbesondere die Dämpfe von Kalium und Magnesium, wahrscheinlich auch in Folge des von ihnen erregten ultravioletten Lichtes.

W. *Hallwachs* *) hat gezeigt, dass das ultraviolette Licht auch auf statisch geladene Leiter von Einfluss sei. Eine isolirte Zinkplatte war mit dem Knopfe eines Goldblattelektroskops leitend verbunden, der ganze Apparat durch einen Schirm von Zinkblech vor den Strahlen einer Bogenlampe geschützt. Wurde nun das Zink *negativ* geladen, so divergirten die Blättchen und behielten diese Divergenz Tage lang. Liess man aber die Strahlen der Bogenlampe durch ein Fenster aus Marienglas (Gyps) auf die Zinkplatte fallen, so fielen die Goldplättchen sofort zusammen. Bei positiver Ladung geschah dies nur sehr allmälig. Auch *Hallwachs* bestätigte, dass die Wirkung durch Zwischenschaltung von Medien, welche ultraviolettes Licht absorbiren, aufgehoben wird, wie dies schon *Hertz* nachgewiesen. Alle näheren Untersuchungen führen zur Annahme, dass bei Belichtung negativ elektrischer, blanker Metallplatten die Oberflächen derselben eine solche Aenderung erleiden, dass negativ elektrische Theilchen von ihnen weggehen und der Abstossung folgen können. Auch hat *Hallwachs* beobachtet, dass nichtelektrische Platten durch die Bestrahlung schwach positive Ladungen annehmen. Wir enthalten uns hier einer Mittheilung der bisher versuchten theoretischen Erklärungen dieser Thatsachen, weil dieselben noch keinen befriedigenden Abschluss erlangt haben.

Die neueren Transformatoren und ihre Anwendung 238
zur elektrischen Beleuchtung. Die Kraftlinien eines Magnetstabes gehen von seinem Nordpole aus in das umgebende Medium, z. B. die Luft, über und treten beim Südpole wieder in den Stab ein, den sie dann seiner Länge nach durchsetzen. Es lässt sich zeigen, dass zwischen diesem *Kreislauf der Kraftlinien*, den man wohl

*) Wiedem. Ann. XXXIII, S. 301 (1888). Göttinger Nachrichten 1888, VIII, S. 176.

auch den magnetischen Stromkreis nennt, einerseits und dem elektrischen Stromkreise andererseits gewisse Analogien bestehen. So wie es für die Elektricität gute und schlechte Leiter giebt, so auch für den Magnetismus. So wie der elektrische Strom bei Verzweigungen sich im Verhältniss zu der Leitungsfähigkeit theilt, so theilen sich auch die Kraftlinien im Verhältniss der Permeabilität, wie wir bereits im §. 36 erörtert haben. Der elektrischen Stromstärke ist analog die Anzahl der einen Querschnitt durchsetzenden Kraftlinien.

Wie die Stromstärke abhängt von der elektromotorischen Kraft und dem Widerstande, so hängt die Anzahl der Kraftlinien oder die Intensität des magnetischen Stromkreises ab von der Grösse der magnetisirenden Kraft und von dem magnetischen Widerstande des Mediums. So wie an den Polen einer Batterie oder den Elektroden einer Influenzmaschine Spannungserscheinungen und Fernwirkung auftreten, sobald die gute Leitung durch die schlecht leitende Luft unterbrochen wird, während diese Fernwirkung abnimmt, sobald die Leitung überall gleich gut ist, so treten auch am magnetischen Stromkreise an jenen Stellen Pole mit Fernwirkung auf, wo die Kraftlinien aus dem gut leitenden Eisen in die schlecht leitende Luft übergehen. Schliessen wir die Pole eines Hufeisenmagnets durch Anlegung eines eisernen Ankers, so geht die Fernwirkung derselben zum grössten Theile verloren, die Anzahl der Kraftlinien aber nimmt zu, weil der magnetische Widerstand abnimmt. Man drückte dies bisher so aus, dass der freie Magnetismus abgenommen, der gebundene zugenommen habe.

Denken wir uns jetzt ein weiches Hufeisen, zunächst ohne Anker, mit zwei separaten Drahtwindungen versehen, wovon die eine als primäre, die andere als secundäre Spirale dient. Sobald wir den Strom schliessen, wird das Hufeisen zum Magnet und alle seine Kraftlinien gehen durch die Spiralen hindurch. Es hat dies dieselbe Wirkung, als hätten wir den Magnet mit seinen Kraftlinien aus unendlicher Ferne herbei geschafft und die Windungen des Drahtes durchschneidend in das Innere der Spiralen eingeführt. Wir bekommen daher die bekannten Inductionsströme; ebenso beim Oeffnen des primären Stromes.

Setzen wir dem Hufeisen den Anker an und wiederholen das Experiment, so ist die Inductionswirkung stärker, obwohl der Magnet nach aussen schwächer ist. Dies erklärt sich dadurch, dass der geschlossene Magnet mehr Kraftlinien besitzt, da der Widerstand der Luft wegfällt. Daraus folgt dann, dass das Ansetzen und Abreissen des Ankers, während der primäre Strom geschlossen ist, ebenfalls Schliessungs- und Oeffnungsinductionsströme hervorrufen muss, da ja hierbei die Anzahl der Kraftlinien innerhalb der Spiralen vergrössert und verkleinert wird. Dies lässt sich in der That durch den Versuch bestätigen. Es ist also ein Irrthum, wenn man annimmt, dass für die beschriebenen Inductionswirkungen die Erzeugung eines Magnets mit möglichst starken Polen günstig sei. Es ist vielmehr günstig, die nach aussen gehenden Kraft-

linien ganz zu unterdrücken, so dass gar keine Fernwirkung, also auch keine Pole auftreten. Dies erreichen wir zum grössten Theil schon dadurch, dass wir den eisernen Kreis vollständig schliessen. Faraday, der diesen Sachverhalt mit genialem Blicke durchschaut hat, wendete bereits einen solchen geschlossenen Eisenring bei seinen ersten Inductionsversuchen an und erhielt damit die ersten Inductionsfunken. Die

Fig. 783.

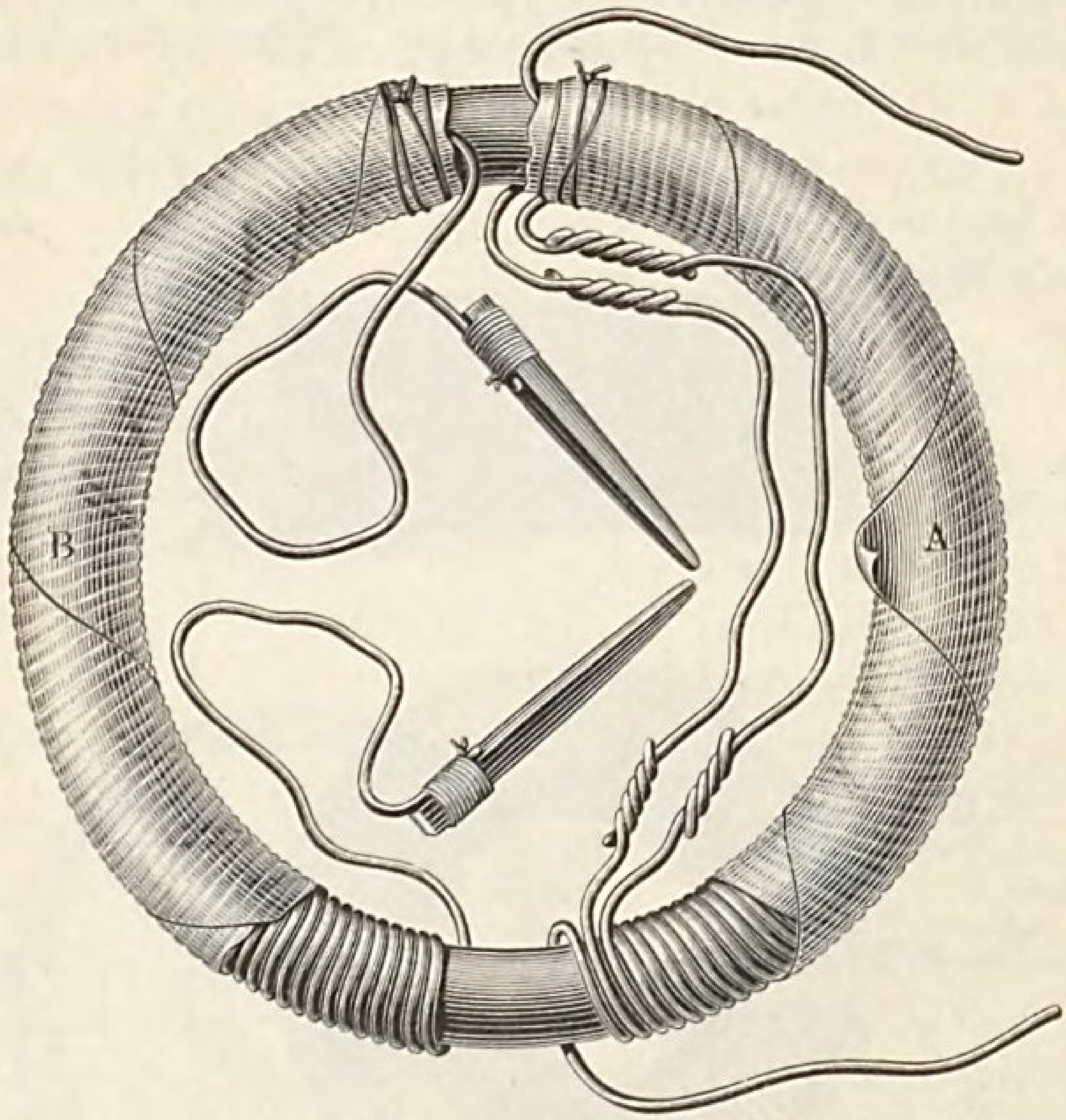
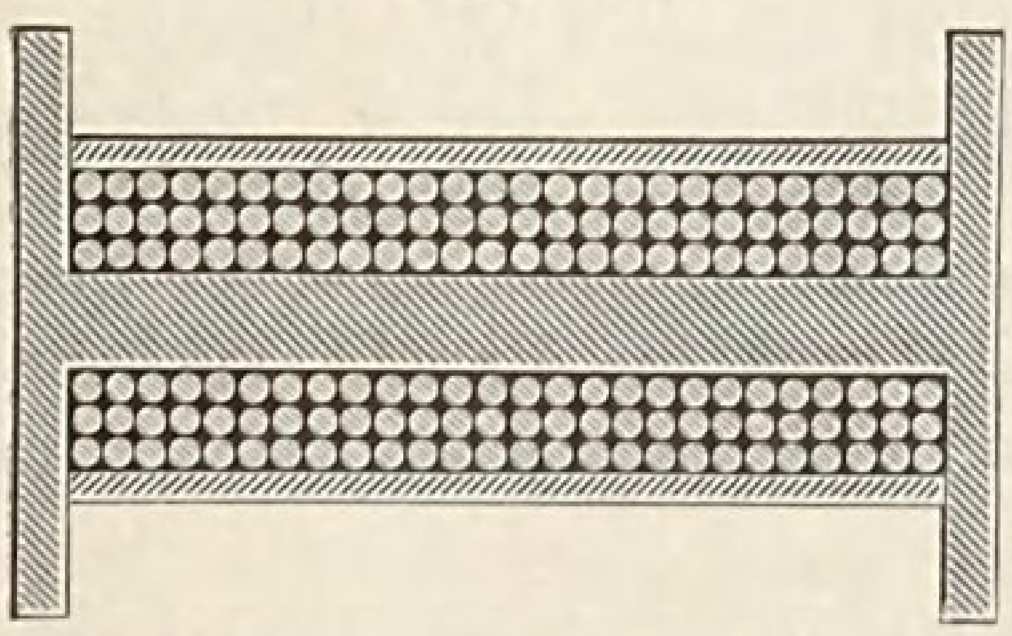


Fig. 783 giebt eine Abbildung seines Apparats. Die Ringhälfte *A* ist von der primären, die Ringhälfte *B* von der secundären Spirale umgeben.

Merkwürdigerweise wurde das Princip der geschlossenen Magnetstromkreise bei den Inductionsapparaten von Page und von Ruhmkorff wieder aufgegeben.

Fig. 784.

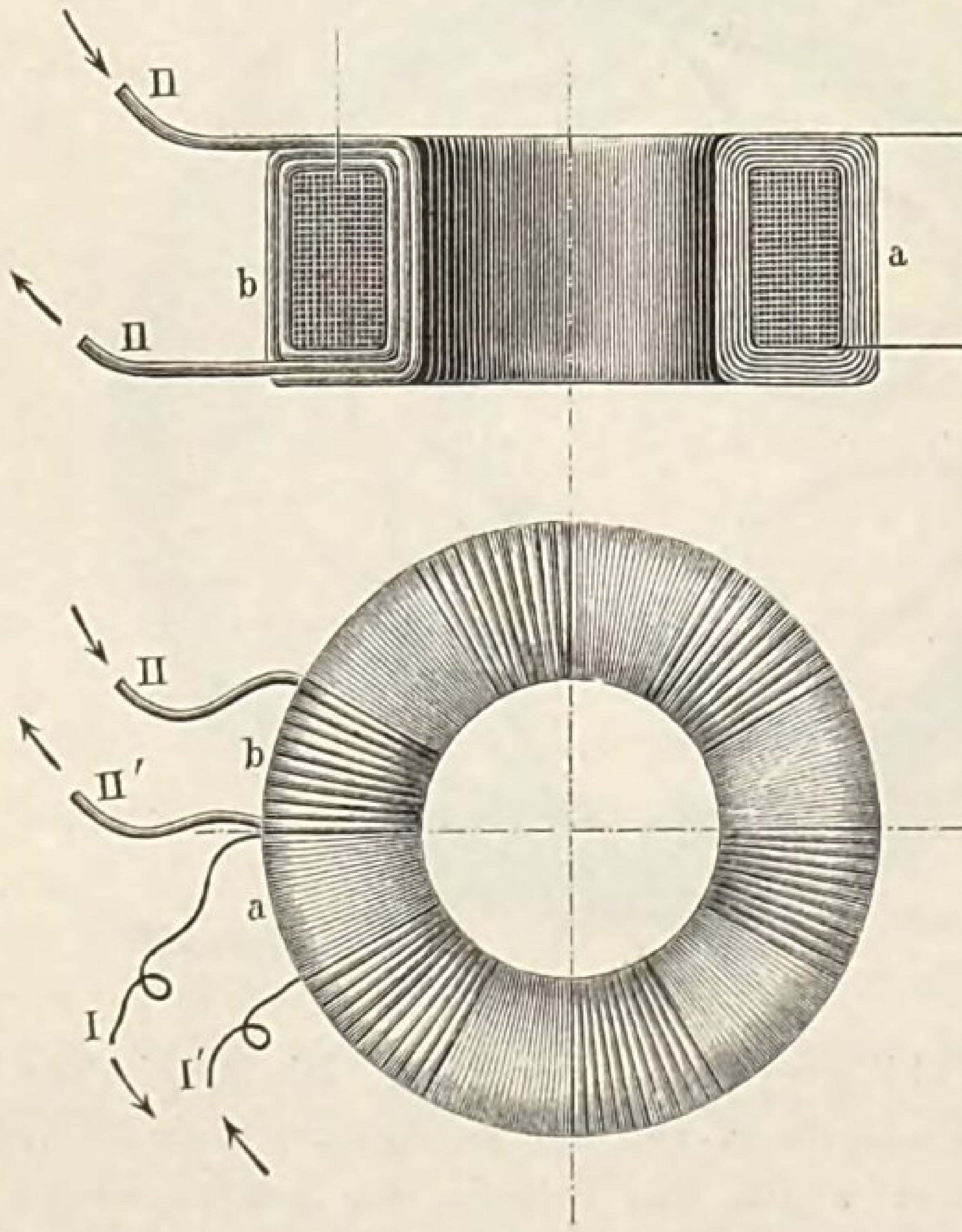


Erst die Brüder C. T. und E. B. Bright construirten 1852 wiederum Inductionsapparate mit geschlossener Eisenleitung, indem sie den Eisenkern der Spiralen mit Endplatten versahen und die Spirale selbst in einen eisernen Cylinder einhüllten, wie Fig. 784 im Längsschnitt darstellt. Auch verwendeten die Erfinder bereits Apparate mit mehreren parallel gestellten Eisenkernen, welche von Spulen umgeben und an den Enden mit Eisen verbunden waren, wodurch sie sich

jener Construction näherten, welche 1883 von Gaulard und Gibbs zum Zwecke der elektrischen Beleuchtung im Grossen ausgeführt wurde.

Der Zweck dieser neueren Inductionsapparate war aber nicht mehr der den Funkeninductoren zu Grunde liegende, sondern gerade der umgekehrte. Während die bisherigen Inductionsapparate dazu dienten, durch Aufwand starker Ströme geringer Spannung solche von geringerer Intensität, aber viel höherer Spannung zu erzeugen, sollen die neueren Apparate umgekehrt die hochgespannten Ströme der Wechselstrom-

Fig. 785.

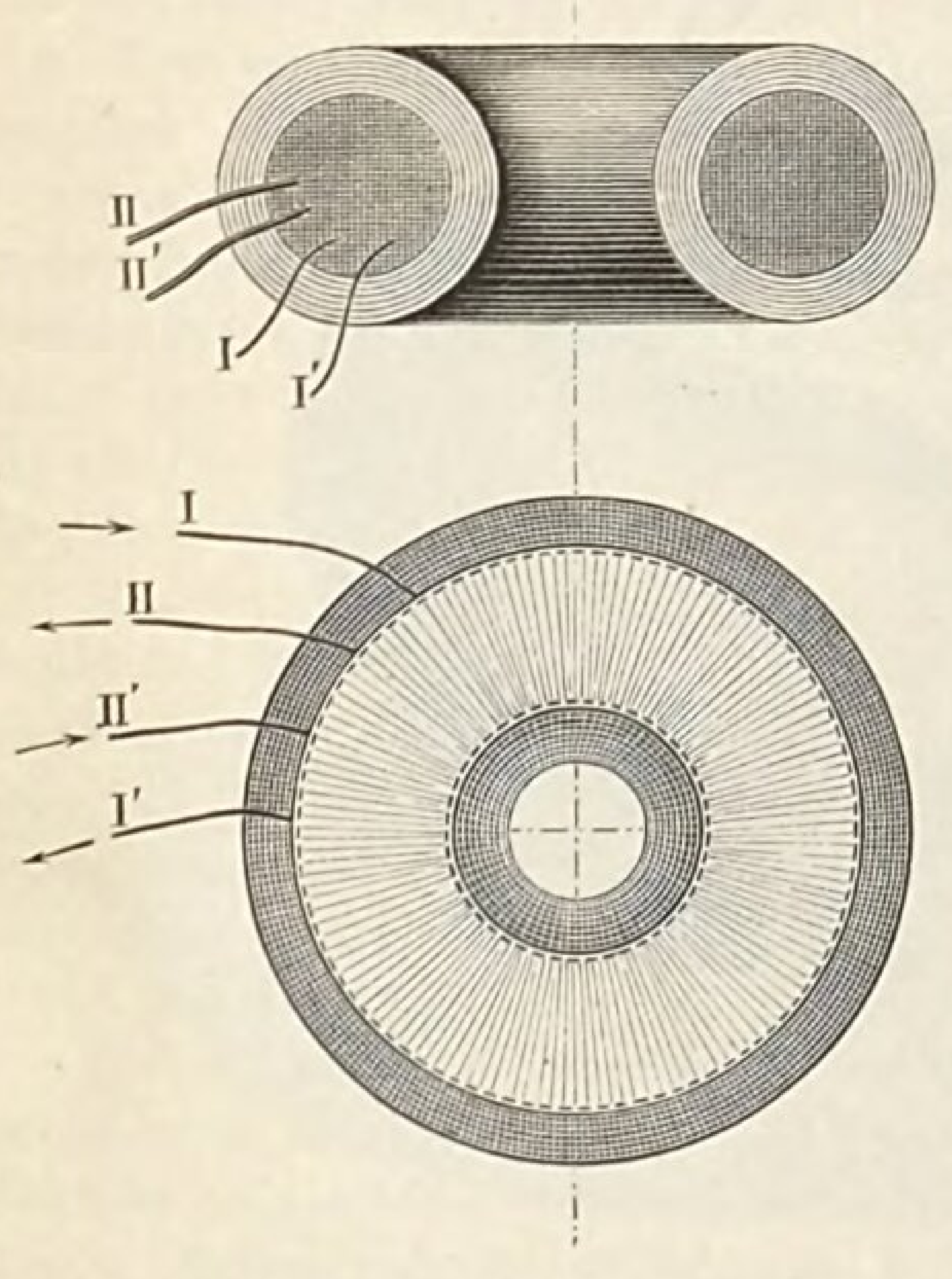


maschinen in Ströme grösserer Intensität, aber geringerer Spannung umwandeln. Man nennt diese Inductionsapparate Transformatoren, obwohl dieser Name auf alle Inductionsapparate passt. Indem wir bezüglich der historischen Entwickelung dieser Apparate auf Specialschriften *) verweisen, wollen wir sofort zu den neuesten Formen derselben übergehen. Die bisher erwähnten haben alle noch die Unvollkommenheit an sich, dass sie noch Pole besitzen, und zwar auch jener Ringapparat

*) F. Uppenborn, Geschichte der Transformatoren, München 1888. Martin Krieg, Die Erzeugung und Vertheilung der Elektricität durch Wechselstrommaschinen und Transformatoren, Magdeburg 1888. Ganz u. Comp., Die elektrische Beleuchtung von Centralstationen, System Zipernowsky-Déri und Blathy, Budapest 1888.

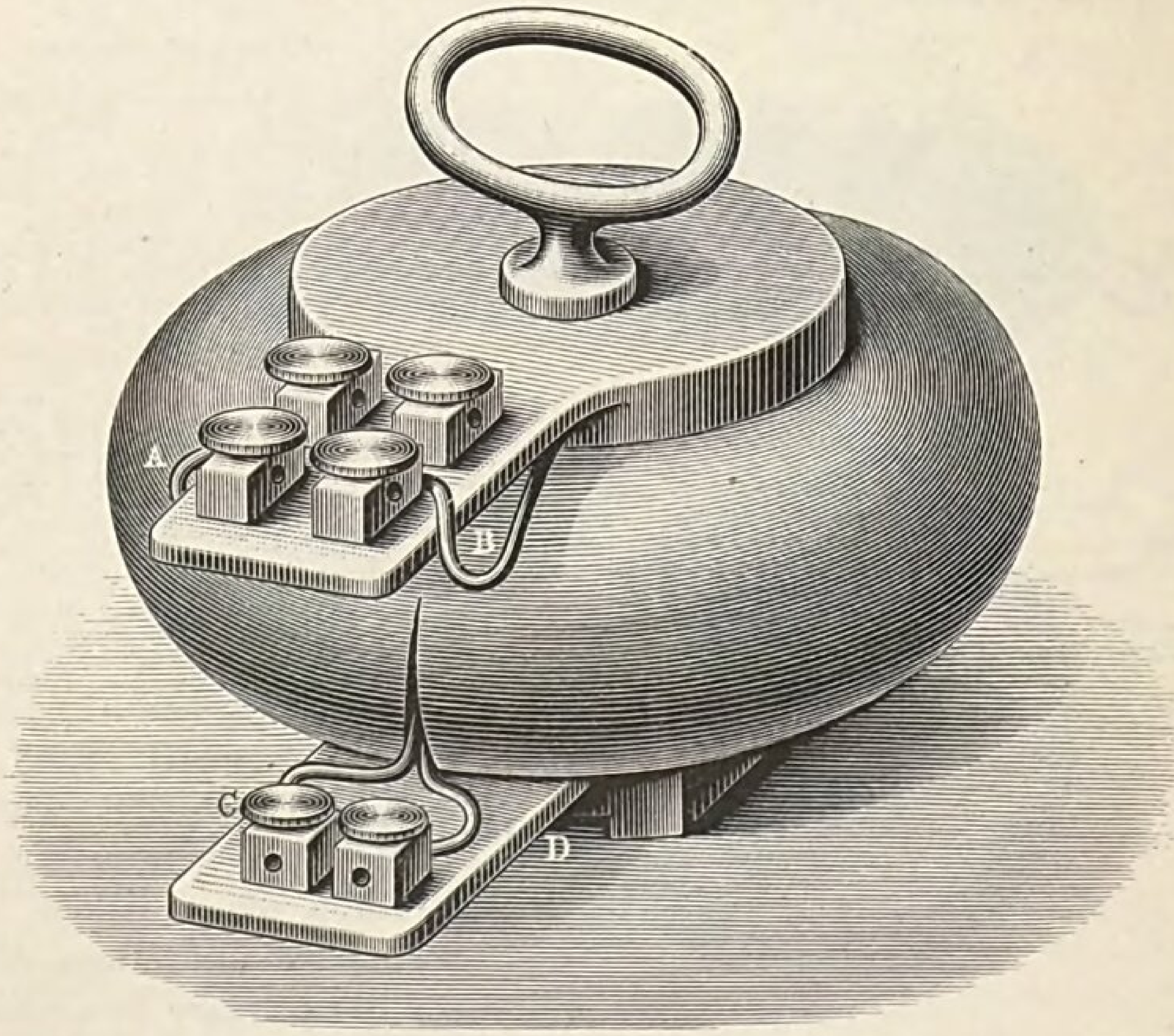
von Faraday in Fig. 783. Seine Pole befinden sich an den Enden der primären Spirale. Der Eisenring bietet wohl den Kraftlinien überall den gleichen Widerstand dar, aber die magnetisirende Kraft ist nicht überall gleich gross. Sollen die Pole ganz verschwinden, also alle Kraftlinien ausschliesslich innerhalb der Spiralen im Eisen verlaufen, so müssen die magnetisirenden Windungen des primären Stromes über den ganzen Ring gleichmässig vertheilt sein. Ebenso wird man den secundären Draht über den ganzen Ring gleichmässig vertheilen, damit auch die Inductionsströme keine Pole erzeugen und die Inductionswirkung am besten ausgenutzt werde. Dadurch entsteht ein Ringmagnet ohne Pole, welcher keine magnetischen Fernwirkungen äussern kann, aber vermöge seiner zahlreichen Kraftlinien beim Entstehen und Vergehen des Magnetismus eine um so kräftigere Inductionswirkung ausübt. Einen derartigen „Ringtransformator" liessen sich C. Zipernowsky und M. Déri in Budapest im Februar 1885 patentiren. Die Fig. 785 giebt eine Abbildung im Verticaldurchschnitt und im Grundriss. Wir haben da gewissermaassen einen Gramme'schen Ring mit dem Unterschiede, dass die Wickelung aus zwei separaten Drähten, einem dicken für die secundäre und einem dünnen für die primäre Stromleitung, besteht. Der Eisenkern ist zur Vermeidung der Foucault'schen Ströme aus isolirtem Eisendraht hergestellt. Die Erfinder haben aber noch einen Transformator beschrieben, welcher gewissermaassen die Umkehrung des vorigen ist, indem man Eisen mit Kupfer vertauscht. Der Ringkern ist aus der primären und secundären Drahtleitung gewickelt und dann von aussen mit Eisendraht quer überwickelt, Fig. 786. Nach dem, was wir über die Kraftlinien eines Stromes im §. 215 mitgetheilt, übersieht man sofort, dass die Anordnung des Eisens rund um die Axe der Kupferdrähte herum der Entwickelung der Kraftlinien, also auch der Inductionswirkung sehr günstig sein müsse. Fig. 787 (a. f. S.) zeigt das Aeussere eines solchen Ringtransformators in perspectivischer Darstellung; C und D sind die Klemmen für den secundären, A und B für den primären Strom.

Fig. 786.



Dieses System hat nur den Nachtheil der geringen Zugänglichkeit der inneren Theile im Falle einer Reparaturbedürftigkeit. Das Streben der Elektriker geht nun dahin, unter Beibehaltung der Principien den Transformatoren eine technisch leicht ausführbare und in allen Theilen leicht zugängliche Form zu geben. Die kupfernen Leitungsdrähte werden dabei mit Eisen ganz eingehüllt und das letztere aus gegenseitig isolirten Draht- oder Blechlagen derartig zusammengesetzt, dass die Kraftlinien in senkrecht zu den Kupferdrähten stehenden Ebenen geschlossene Kreise bilden können, während für Ströme, welche parallel

Fig. 787.



mit den Kupferdrähten inducirt werden könnten, jeder Weg im Eisen durch die isolirenden Zwischenschichten abgeschnitten wird.

Wir haben oben bemerkt, dass die neueren Transformatoren im Gegensatze zu den Funkeninductoren die Aufgabe haben, hochgespannte Ströme geringer Intensität in minder gespannte Ströme grösserer Intensität überzuführen, und haben nun noch zu erklären, warum dieses Bedürfniss vorliegt, da man ja letztere Ströme billiger direct mittelst Dynamomaschinen erzeugen könnte.

Eine Dynamomaschine, welche bei verhältnissmässig geringer elektromotorischer Kraft einen Strom grosser Intensität erzeugt, muss einen geringen inneren Widerstand haben. Ein solcher Strom wird aber durch einen grösseren äusseren Widerstand in sehr raschem Verhältnisse geschwächt. Will man daher elektrische Energie zum Zwecke des Betriebes

von Glühlicht- oder Bogenlichtlampen auf weitere Strecken übertragen, so gelten dieselben Erwägungen, wie bei der elektrischen Kraftübertragung (§. 213), wo wir gezeigt haben, dass nur durch Ströme, welche mit grosser elektromotorischer Kraft erzeugt werden, die Energieverluste in der Leitung auf einen verhältnissmässig niedrigen Betrag reducirt werden können. Wollte man aber solche Ströme direct zum Betriebe der Lampen verwenden, so müsste man, um genügenden Nutzeffect zu erhalten, die letzteren hinter einander in die Leitung einschalten, was, wie die Erfahrung zeigte, leicht zu Störungen Anlass geben kann. Ausserdem wäre die Zuleitung so hochgespannter Ströme von 1000 bis 2000 Volt bis zu den Lampen selbst eine viel zu gefährliche Einrichtung, da eine zufällige Berührung der Drähte tödlich wirken könnte. Erzeugt man aber Wechselströme mit hoher elektromotorischer Kraft, so kann man dieselben mit verhältnissmässig geringem Energieverluste auf grössere Strecken bis zu einem Transformator führen, dort in Wechselströme von grosser Intensität aber geringer ungefährlicher Spannung (etwa 100 Volt) transformiren und diese dann zu den benachbarten Lampen führen. Hat man weit von einander entfernte Gruppen von elektrischen Lampen mit Strom zu versehen, so giebt man jeder Gruppe einen besonderen Transformator.

Das Centralbeleuchtungssystem von Zipernowsky-Déri-Bláthy beruht auf der Anwendung solcher Ringtransformatoren, welche parallel zu einander in die Hauptleitung eingeschaltet werden, während man bisher die Transformatoren hinter einander einschaltete. Man erhält hierdurch, wie sich zeigen lässt, den grossen Vortheil, dass die Transformatoren sich gegenseitig nicht stören und dass jeder Lampengruppe nur so viel Strom zugeführt wird, als sie braucht.

Die Theorie der Transformatoren wird durch den Umstand zu einer complicirten und schwierigen, dass man es da mit Strömen von fortwährend wechselnder Intensität zu thun hat. Zum Verständnisse des Obigen dürften jedoch nachfolgende Darlegungen ausreichen.

Es seien r_1 und n_1 Widerstand und Windungszahl der primären, ebenso r_2 und n_2 der secundären Spirale eines Transformators. Die Enden der primären Spirale seien mit den Polen einer Wechselstrommaschine verbunden, welche bei einer (mittleren) Klemmspannung $= e_1$ einen Strom von der (mittleren) Intensität i_1 liefert.

Dieser Strom erzeuge durch Induction in der primären Spirale eine elektromotorische Gegenkraft ε_1, in der secundären Spirale eine elektromotorische Kraft ε_2. Die Enden der letzteren seien durch eine Nutzleitung vom Widerstande R verbunden; der in dieser zu Stande kommende Strom sei i_2, die Potentialdifferenz an den Klemmen der Nutzleitung $= e_2$.

Wir haben dann folgende Gleichungen:

$$i_1 = \frac{e_1 - \varepsilon_1}{r_1}, \quad i_2 = \frac{\varepsilon_2}{R + r_2},$$

woraus:

$$e_1 = \varepsilon_1 + i_1 r_1, \quad \varepsilon_2 = i_2 R + i_2 r_2.$$

Die Widerstände r_1 und r_2 werden nun in der Praxis so klein gewählt, dass die Producte $i_1 r_1$ und $i_2 r_2$ neben den anderen Grössen nahezu verschwinden, so dass also mit Annäherung gesetzt werden kann:

$$e_1 = \varepsilon_1, \quad \varepsilon_2 = i_2 R = e_2.$$

Die in den beiden Spiralen durch den primären Strom geweckten elektromotorischen Kräfte ε_1 und ε_2 sind der Anzahl der Windungen n_1 und n_2 proportional, mithin

$$\varepsilon_1 = \frac{n_1}{n_2} \varepsilon_2,$$

und angenähert auch:

$$e_1 = \frac{n_1}{n_2} e_2.$$

Die Potentialdifferenzen an den Klemmen der primären und secundären Leitung verhalten sich also (angenähert) wie die Windungszahlen derselben. Das Verhältniss $\frac{n_1}{n_2}$ nennt man daher den Umsetzungscoëfficienten des Transformators.

Will man die Stromstärke in einer Anzahl parallel geschalteter elektrischer Lampen constant erhalten, so muss man die Potentialdifferenz der Hauptzuleitungsdrähte constant halten. Sind diese Zuleitungsdrähte ausgehend von den Klemmen der secundären Spirale eines Transformators, so hat man nur die primäre Klemmspannung derselben constant zu erhalten, um damit indirect jeder einzelnen Lampe die nöthige constante Stromstärke zu sichern, mögen nun viele oder wenige dieser Lampen in Gebrauch genommen sein. Sind endlich mehrere Transformatoren parallel in die Leitung der Wechselstrommaschine geschaltet, so hat man nur dafür zu sorgen, dass die (mittlere) Klemmspannung der letzteren constant bleibe*).

239 **Inductionsströme höherer Ordnung.** Henry hat nachgewiesen, dass ein Inductionsstrom im Stande ist, wieder inducirend auf eine geschlossene Spirale zu wirken. Der primäre Strom ging durch die 30 m lange Bandspirale I (Fig. 788); über dieser befand sich die 20 m lange

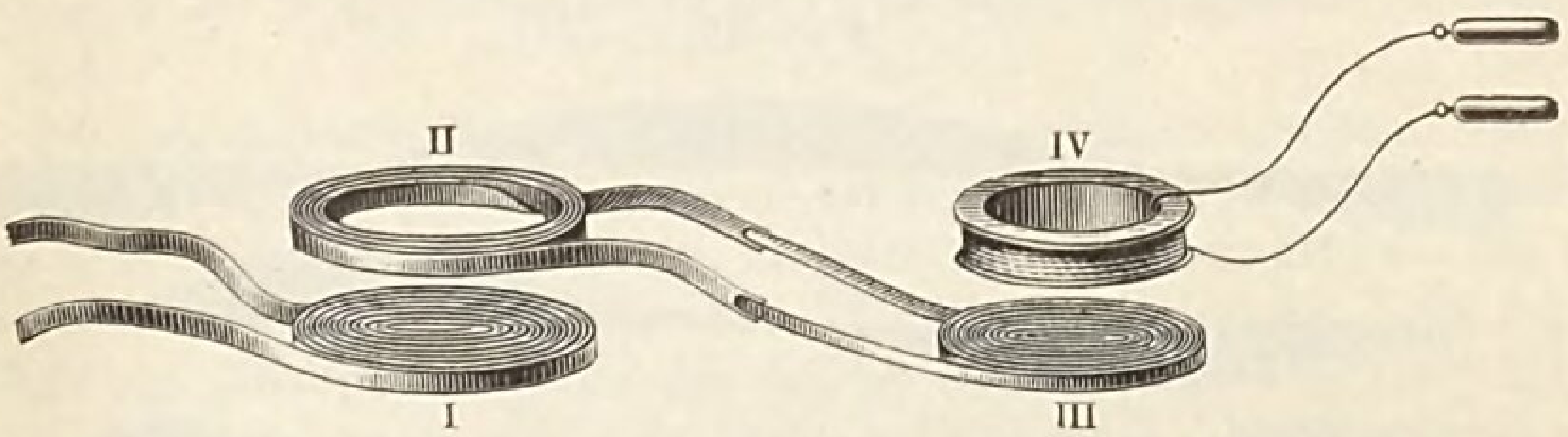
*) Eingehenderes in: Silv. Thompson, Note on transformers for electric distribution. Industries, Tom. 2, 1887; G. Ferraris, Ricerche teor. e sperim. sul generatore secondario Gaulard e Gibbs; Roiti, di un electrocalorimetro et di alcuni misure fatte con esso intorno al generatore secondario Gaulard e Gibbs (Mem. della R. Acc. di Torino [2] 37, 1885); G. Ferraris, Maassergebnisse an den Transformatoren von Zipernowsky, Déri und Blathy, Wien. Elektr. Zeitschr. III, 451 (1885).

Bandspirale II; die Enden von II waren mit denen einer dritten Bandspirale III verbunden, welche gleichfalls aus einem 20 m langen, aber nur 2 cm breiten Kupferstreifen gemacht war; da die Spirale III den Schliessungsbogen von II bildet, so muss in III der Strom circuliren, welcher in II durch den Einfluss der Stromunterbrechung in I inducirt wird. Der Strom in III konnte nun inducirend auf die Drahtrolle IV wirken. In der That bekam man bei Anfassung der Handhaben *e* und *f* kräftige Schläge.

Aehnliche Resultate wurden auch mit anderen Combinationen von Draht- und Bandrollen erhalten.

Nennt man den Strom in I den primären, so ist der in II und III der secundäre, der in IV endlich der tertiäre, oder es ist der Strom

Fig. 788.



in IV ein inducirter Strom zweiter Ordnung, der in II und III ein inducirter Strom erster Ordnung.

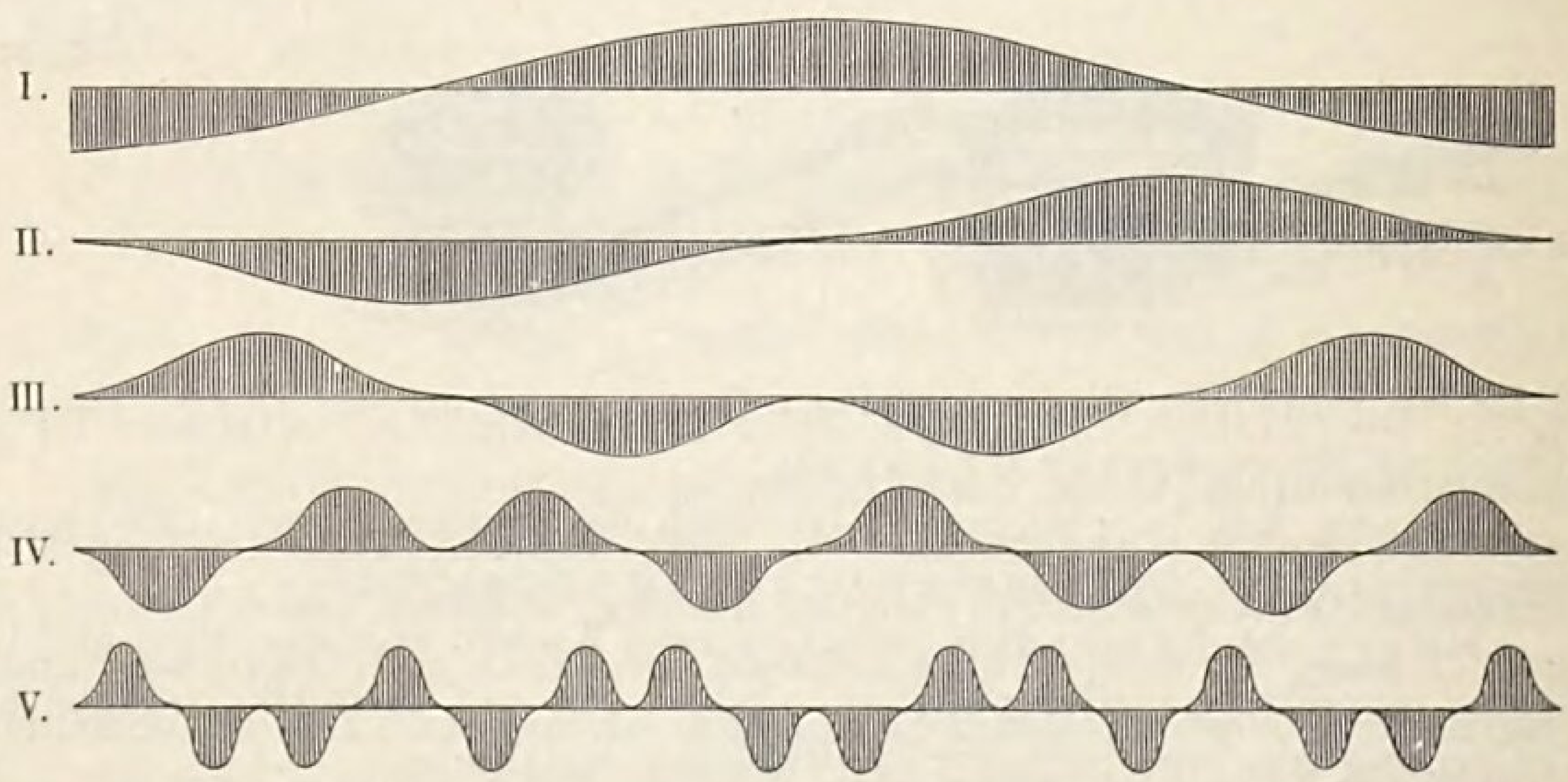
Henry hat in gleicher Weise auch die Existenz von Inductionsströmen dritter und vierter Ordnung nachgewiesen.

Henry fand auch, dass zwischen zwei flachen Spiralen wie I und II, welche einander parallel gehalten sind, noch auf ziemlich bedeutende Entfernung hin eine inducirende Wirkung stattfindet.

Es ist leicht, den Verlauf der Ströme höherer Ordnung zu verfolgen, wenn man die Bildung von Extraströmen in den verschiedenen Spiralen unberücksichtigt lässt. In Fig. 789 stellen die Abscissen die Zeiten, die Ordinaten der Curve I die Stromintensitäten eines Inductionsstromes vor, wie er etwa durch Rotation eines kreisförmigen Leiters oder einer Spule (Siemensinductor) im magnetischen Felde entsteht. Die Curve hat den Verlauf einer Sinuswelle, von welcher in I eine ganze Wellenlänge abgebildet ist. Sie beginnt mit einem negativen Maximum, geht durch Null zum positiven Maximum und dann wieder durch Null zum negativen Maximum. Dieser Inductionsstrom ruft in einer parallelen Leitung einen Inductionsstrom zweiter Ordnung hervor, dessen Verlauf durch die Curve II dargestellt ist. Zunächst ist seine Intensität in jenen Zeitmomenten gleich Null, wo sich die Intensität des inducirenden Stromes nicht ändert, also dort, wo der letztere seine positiven und negativen Maxima hat. In der Figur ist dies am Anfang und Ende, sowie in der Mitte der Fall. Zwischen diesen Zeitpunkten gerade in der Mitte, wo die momentane Intensität das Zeichen wechselt, hat der inducirende Strom die raschesten

Aenderungen seiner Intensität, also die Curve den steilsten Anstieg oder Abfall. Diesen Zeitmomenten entspricht im inducirten Strom ein negatives oder positives Maximum. Die Maxima des inducirten Stromes sind also gegenüber jenen des inducirenden um $^1/_4$ Wellenlänge verschoben. Betrachten wir diese Wellen als Tonwellen, so würden wir sagen, sie entsprechen derselben Tonhöhe, aber verschiedener Klangfarbe, denn die Form der Wellen ist verschieden. Die Welle I ist von der Abscissenaxe nach auswärts nirgends concav, während dies bei der Welle II der Fall ist. Geht man nach demselben Princip zur Construction der Intensitätscurven höherer Inductionsströme über, indem man stets dort die Intensität gleich Null setzt, wo die Curve des inducirenden Stromes eine horizontale Lage hat, dagegen dort ein negatives oder positives Maximum ansetzt, wo die Curve des inducirenden Stromes den raschesten Anstieg

Fig. 789.



oder Abfall zeigt, so erhält man die Curven III, IV, V, entsprechend den Inductionsströmen der III., IV., V. Ordnung.

Für die Inductionsströme höherer Ordnung gilt ebenso wie für die der ersten Ordnung das Gesetz, dass der Quantität nach die directen (mit dem Hauptstrom gleich gerichteten) und die umgekehrten (die dem Hauptstrom entgegengesetzt gerichteten) Inductionsströme einander ganz gleich sind, weshalb denn auch an keiner der Polplatten ein Kupferniederschlag sich bildet, wenn man in den Schliessungsbogen einer Inductionsspirale höherer Ordnung ein Voltameter einschaltet, welches mit einer Lösung von Kupfervitriol gefüllt ist.

Dagegen ist die Intensität der directen und umgekehrten Inductionsströme höherer Ordnung durchaus nicht gleich, wie es nach Fig. 789 den Anschein haben könnte, bei deren Construction der Einfluss der nie fehlenden Extraströme ganz unberücksichtigt geblieben ist. Ob jedoch für irgend eine höhere Ordnung der Inductionsströme die directen oder die umgekehrten von grösserer elektromotorischer Kraft sein werden.

lässt sich nicht wohl auf theoretischem, wohl aber auf experimentellem Wege ermitteln.

Henry liess die Inductionsströme verschiedener Ordnung durch eine kleine Drahtspirale gehen, in welche er eine Stahlnadel einlegte. Diese Stahlnadel wurde nun durch die Inductionsströme magnetisirt.

Da nun aber die directen und umgekehrten Ströme in Betreff der Quantität der Elektricität gleich sind, so kann die Magnetisirung der Nadeln nur daher rühren, dass bei gleicher elektrischer Quantität die intensiveren Ströme kräftiger magnetisirend wirken, wahrscheinlich weil durch sie die Coërcitivkraft des Stahls leichter überwunden wird. Aus der Polarität der magnetisirten Stahlnadeln ergiebt sich nun, dass für Inductionsströme erster, dritter etc. Ordnung die directen, für Inductionsströme zweiter, vierter etc. Ordnung aber die umgekehrten von überwiegender magnetisirender Kraft, also auch von grösserer Intensität sind.

Zu dem gleichen Resultat gelangte Masson auf folgendem Wege: Er schaltete in den Schliessungsbogen der Inductionsspirale höherer Ordnung ein Wasser-Voltameter ein, in welchem die Platinplatten durch Wollaston'sche Platinspitzen (§. 90) ersetzt waren. Es entwickelt sich Knallgas an jeder der beiden Polspitzen, ein Beweis, dass die Quantität der nach der einen Richtung strömenden Elektricität derjenigen gleich ist, welche den Draht in der entgegengesetzten Richtung durchläuft. Als aber nach Verdet's Vorgang die Leitung an einer Stelle durch eine Luftschicht unterbrochen wurde, welche nur die intensiveren Ströme in Form von Funken übergehen liess, während sie die weniger intensiven zurückhielt, wurde an der einen Elektrode nur Sauerstoffgas, an der anderen nur Wasserstoffgas ausgeschieden. Die auf diese Weise ermittelte Richtung der intensiveren Ströme stimmt ganz mit derjenigen überein, welche sich aus den Versuchen von Henry ergiebt.

Telephon; Telephonbrücke; Inductionswage. Der Theorie nach sehr nahe verwandt mit dem Vorgange der Kraftübertragung zwischen zwei dynamo-elektrischen Apparaten, wovon einer als Inductionsapparat, der andere als elektromagnetischer Motor wirkt, ist die Schallübertragung mittelst des elektrischen Stromes in dem Telephon von Bell. Dass wir es bei diesem mit minimalen Arbeitsaufwendungen und äusserst schwachen Strömen zu thun haben, ändert nichts an der Aehnlichkeit des Princips, das, freilich in ganz anderer Form, zur Anwendung kommt. Bevor wir jedoch das Bell'sche Telephon beschreiben, müssen wir der vorausgegangenen und bahnbrechenden Erfindung des ersten Telephons von Reis einige Aufmerksamkeit schenken. 240

Seite 637 haben wir erwähnt, dass, wenn man den Strom einer Magnetisirungsspirale, in welcher sich ein Stahldraht befindet, sehr rasch fortwährend unterbricht und wieder herstellt, neben dem Eigentone des

Stabes noch ein anderer Ton auftrete, dessen Höhe mit dem Tone des Unterbrechungsapparates übereinstimmt.

Fig. 790.

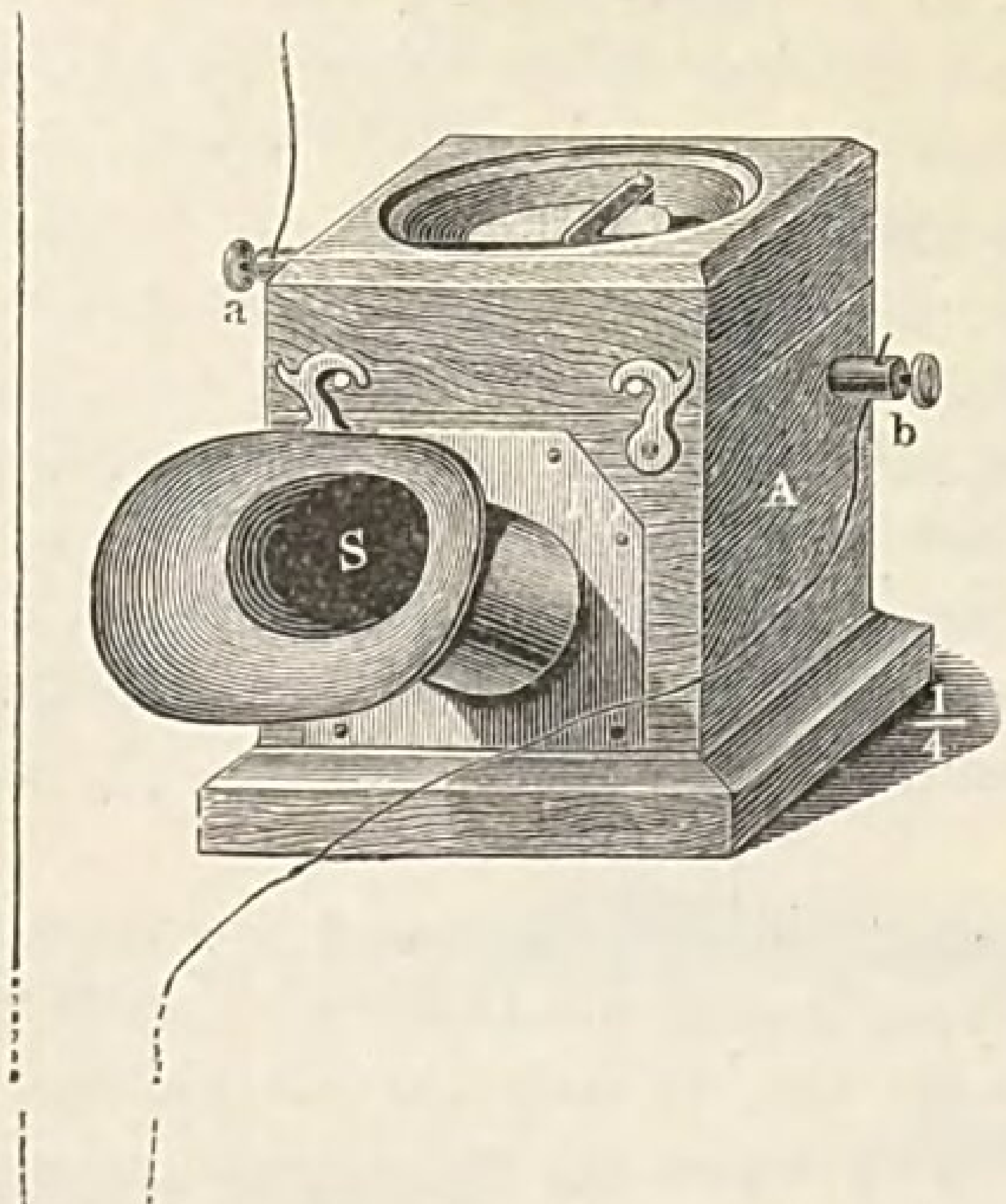


Fig. 791.

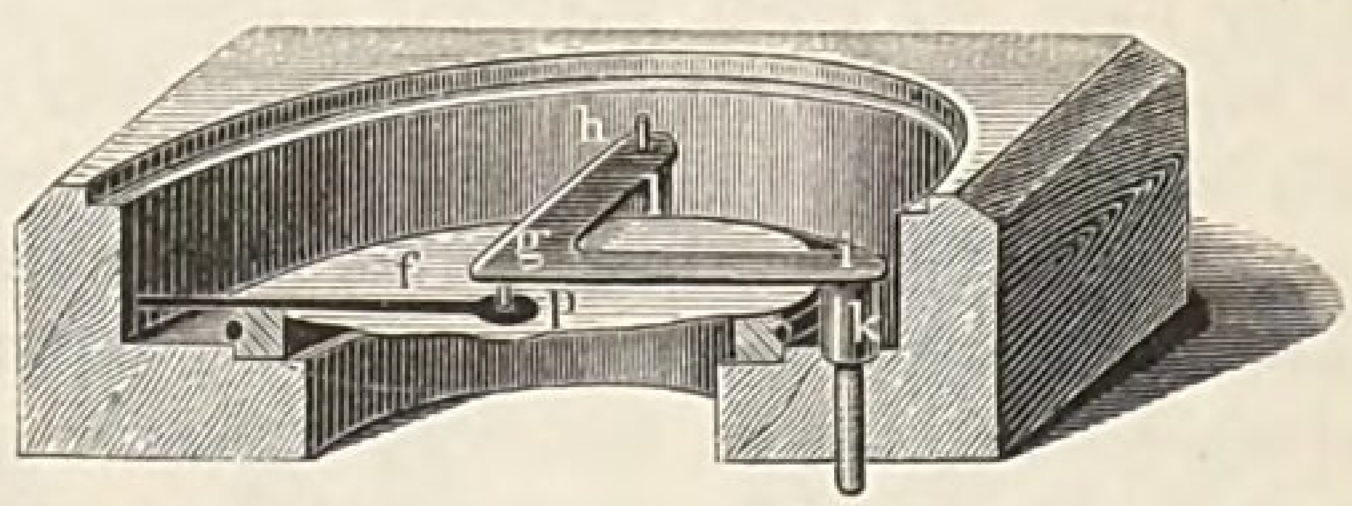
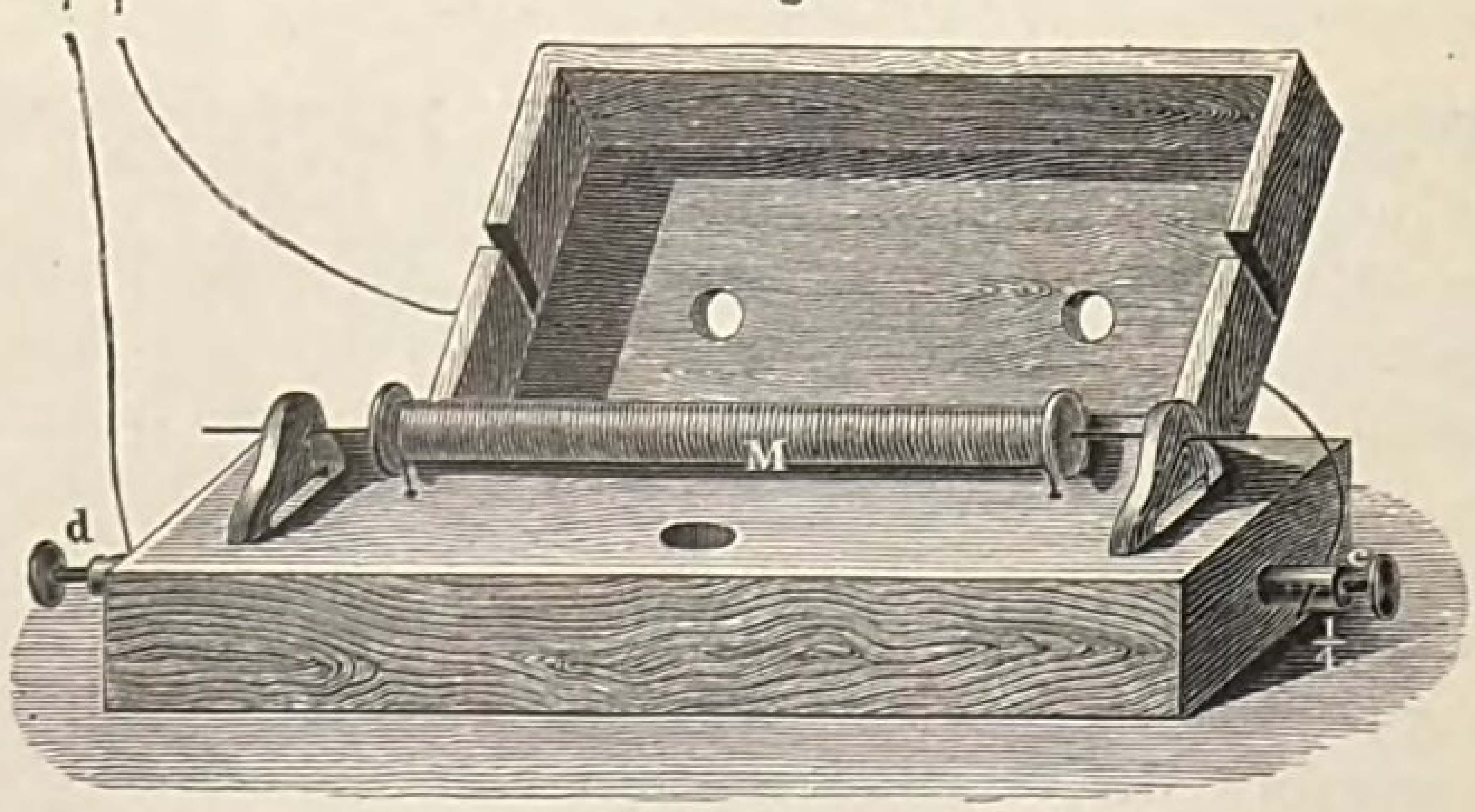


Fig. 792.



Diesen Ton, welcher neben dem knarrenden Klirrgeräusch namentlich dann auftritt, wenn der magnetische Longitudinalton des Stabes durch die Art seiner Einklemmung unterdrückt ist, hat Reis zur Construction seines Telephons benutzt.

Fig. 790 stellt den Reis'schen Aufgabsapparat dar. In dem Deckel des hölzernen Hohlwürfels A ist eine kreisförmige Oeffnung angebracht, welche durch eine darüber gespannte elastische Membran (Schweinsdünndarm) geschlossen ist. Auf die Mitte dieser Membran ist ein kleines Platinplättchen aufgekittet, welches durch ein ganz dünnes Metallstreifchen f (deutlicher in Fig. 791 sichtbar) mit der Klemmschraube a in leitender Verbindung steht.

Auf der Mitte des Platinplättchens ruht ein kurzes Platinstiftchen, welches bei g an der unteren Seite des Blechstückes hgi befestigt ist, dessen eines Ende h auf dem Metallsäulchen l ruht, während ein an seiner Unterseite bei i befestigtes Platinstiftchen in eine etwas Quecksilber enthaltende Höhlung des Metallsäulchens k eingetaucht ist. — Mit dem Metallsäulchen k steht die Klemmschraube b in leitender Verbindung.

Von dem einen Pol der Batterie geht nun ein Leitungsdraht zur Klemmschraube a des Aufgabsapparates, Fig. 790, vom anderen Pol derselben geht ein Draht zur Klemmschraube d des sogleich zu besprechenden Reproductionsapparates, Fig. 792. Die Klemmschraube c dieses Apparates wird durch einen Draht mit b, Fig. 790, verbunden. Die Klemmschrauben c und d sind mit den Drahtenden der kleinen Magnetisirungsspirale M, Fig. 792, verbunden; bei der eben besprochenen Verbindung geht also der Strom der Stromquelle durch die Spirale M hindurch.

Sobald nun die Schallwellen eines hinlänglich kräftigen Tones durch die Mündung S in den Hohlwürfel A eintreten, wird die elastische Membran, welche denselben oben schliesst, in Vibrationen versetzt. Jede eintretende Verdichtungswelle hebt das Platinplättchen sammt dem darauf sitzenden Stiftchen; wenn aber die Membran nach unten schwingt, kann das Blech hgi mit dem bei g befestigten Stiftchen nicht schnell genug folgen, es entsteht also hier bei jeder Vibration der Membran eine Unterbrechung des Stromes, welche sich auch durch ein an der Unterbrechungsstelle auftretendes Fünkchen zu erkennen giebt.

In der Spirale M steckt nun ein Strickdraht, welcher, wie die Figur zeigt, auf einem Resonanzboden befestigt ist. Ein mit einem zweiten Resonanzboden versehener Deckel kann noch über die Spirale geklappt und dadurch der Ton sehr verstärkt werden.

Werden nun Töne vor der Mündung S hervorgebracht, indem man in dieselbe singt oder indem man Orgelpfeifen anbläst, so hört man an dem möglichst entfernt aufgestellten Reproductionsapparate zunächst ein eigenthümlich knarrendes Geräusch, welches von der Tonhöhe der am Aufgabsapparate hervorgebrachten Töne unabhängig ist, ausserdem werden aber diese Töne selbst durch den Stahldraht deutlich wahrnehmbar reproducirt, und zwar fand Reis, dass dies für alle Töne zwischen F und $\bar{\bar{f}}$ der Fall ist.

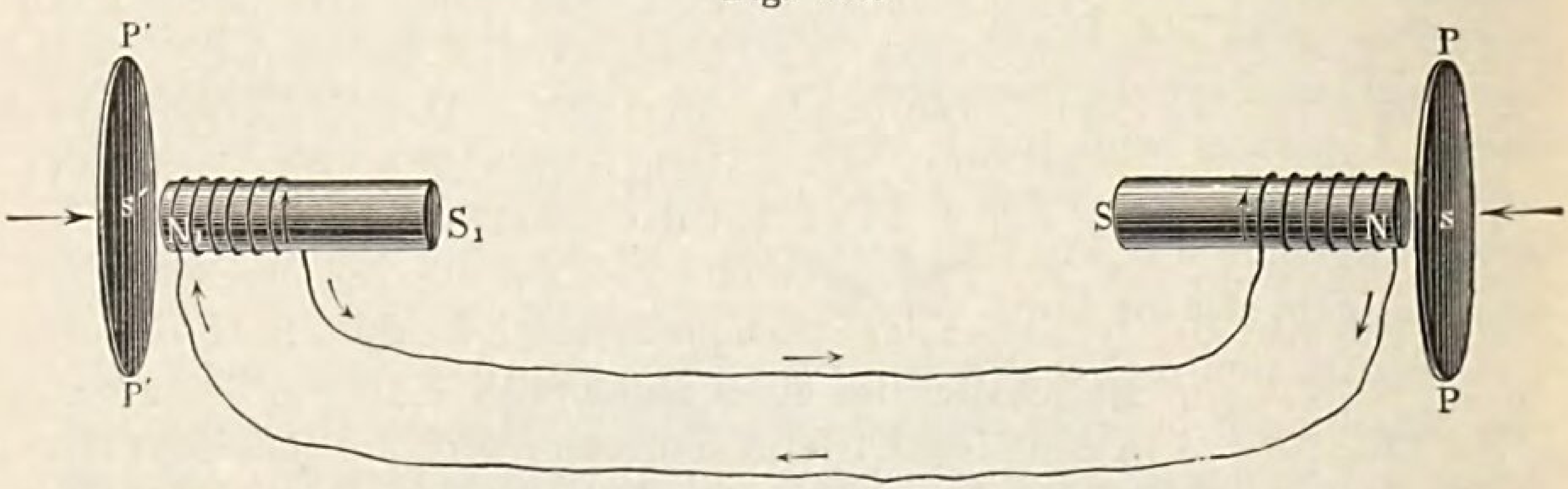
Bei den Versuchen von Reis war der Aufgabsapparat 100 m weit von der Spirale, und zwar in einem anderen Hause bei verschlosse-

nen Thüren aufgestellt. Da nun aber die Länge des Leitungsdrahtes ebenso weit ausgedehnt werden kann, wie bei directer Telegraphie, so gab Reis seinem Apparate den Namen Telephon*).

Das Telephon von Reis hat die Unvollkommenheit, dass durch die Schwingungen der Membran an der Aufgabestation ein Strom nur ganz unterbrochen oder in voller Stärke hergestellt werden kann, dass aber durch die verschiedenen Grössen der Schwingungsintensitäten resp. der Amplituden der Membran nicht auch entsprechende verschiedene Stromintensitäten hervorgerufen werden können. Es ist daher mit diesem Instrumente wohl ein Rhythmus, also eine Tonhöhe, nicht aber eine Klangfarbe zu reproduciren.

Ungleich vollkommener und doch von genialer Einfachheit ist das Telephon von Bell. Um dasselbe zu verstehen, beachten wir zunächst die schematische Fig. 793. SN und $S_1 N_1$ stellen zwei Stahlmagnete

Fig. 793.



vor, PP und $P'P'$ zwei dünne kreisförmige Scheiben aus Eisen, welche den Polen sehr nahe stehen, aber durch eine elastische Kraft davon abstehend erhalten werden. Um die Nordpole beider Magnete ist ein Draht in der aus der Figur ersichtlichen Weise gewickelt und zu einem in sich zurückkehrenden Kreise geschlossen. Die Nordpole N und N_1 induciren in der Mitte der gegenüberstehenden Scheiben Südpole s und s'. Giebt man nun der Scheibe PP einen Stoss in der Richtung des Pfeils gegen den Magnetstab, so wird dadurch der Südpol s der Drahtspirale genähert und erzeugt daselbst einen Inductionsstrom solcher Richtung, der den Südpol s zu entfernen strebt. Dieser Strom hat die Richtung der Pfeile. Derselbe Strom umkreist dann auch den Magneten $N_1 S_1$, verstärkt daselbst den Nordpol und wirkt dadurch sowie direct selbst anziehend auf den Südpol s' der Scheibe $P'P'$. Daraus folgt, dass jede Annäherung der Scheibenmitte s an den Magnetpol N fast gleichzeitig eine Anziehung der Scheibenmitte s' an den Magnetpol N_1 zur Folge hat. Dasselbe gilt beim Zurückziehen der Scheiben von den Polen. Kurz, alle hin- und hergehenden Bewegungen resp. Schwingungen der einen Scheibe rufen sofort gleiche und fast gleichzeitige Schwingungen der anderen Scheibe hervor. Erfolgen nun die Schwingungen der Scheibe PP durch den

*) Jahresber. d. physikalischen Vereins zu Frankfurt a. M. für 1860/61.

Anprall von Schallwellen bestimmter Form, so entstehen Schwingungen der Scheibe $P'P'$, welche ihrerseits in der angrenzenden Luft Schallwellen derselben Form, wenn auch geringerer Intensität, hervorrufen. Da nun die Laute der menschlichen Sprache und die Klänge der musikalischen Instrumente durch Aufeinanderfolgen verschiedenartiger Schwingungen in regelmässiger oder unregelmässiger Wiederkehr gebildet sind, so erklärt sich, dass auf diese Weise eine hörbare Uebertragung der menschlichen Stimme oder anderer Schallbewegungen auf grosse Distanzen durch den Doppeldraht möglich ist.

Fig. 794.

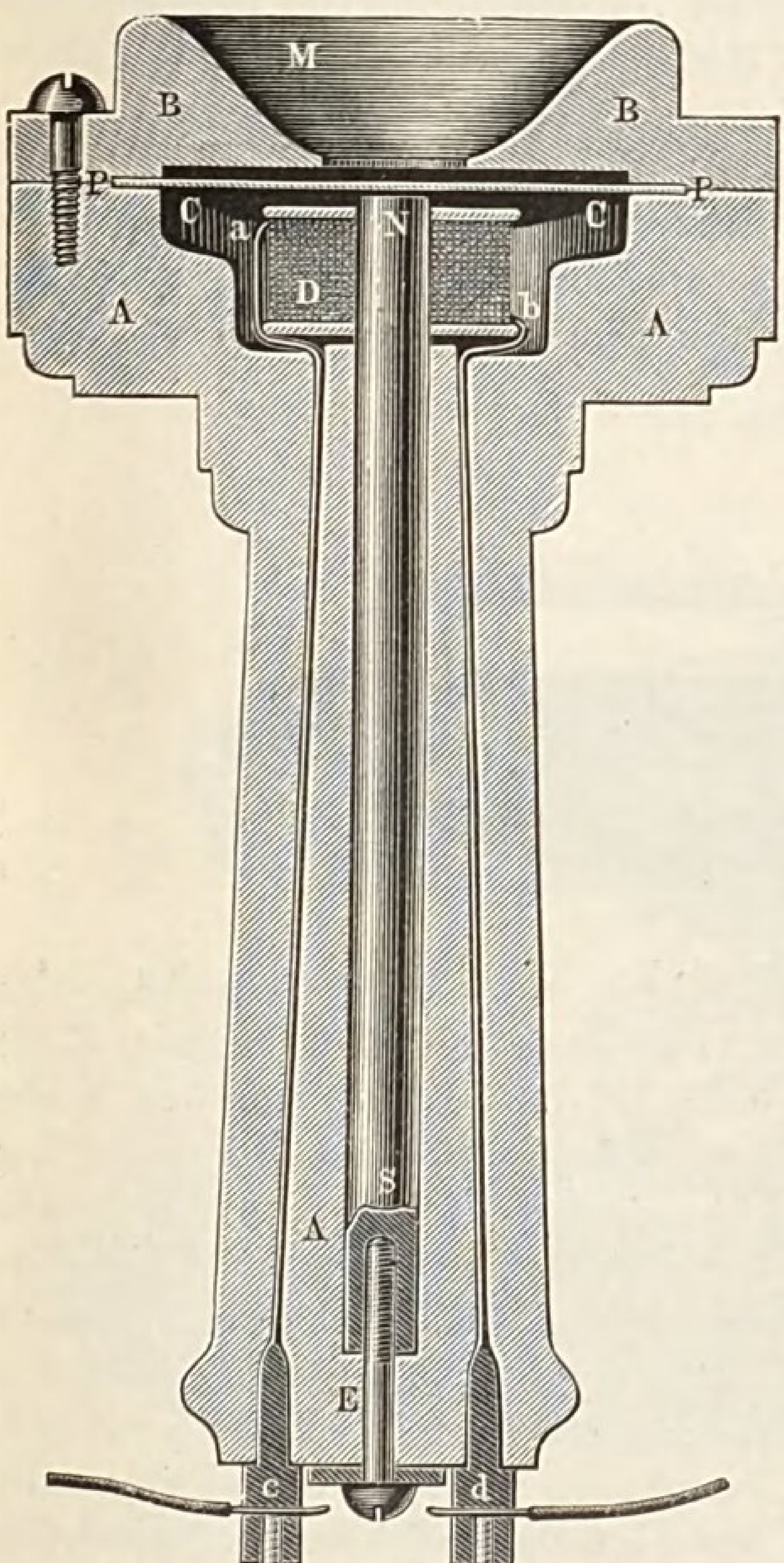


Fig. 794 zeigt ein Telephon von Bell im Längsschnitt in ungefähr $^2/_3$ der natürlichen Grösse. In ein hölzernes Gehäuse AAA ist der Magnetstab NS eingeschlossen und seiner Längenaxe nach mittels der Schraube E ein wenig verstellbar. CC ist eine Aushöhlung des Holzgehäuses, welche die Drahtspule D aufnimmt. Letztere enthält viele Windungen sehr feinen übersponnenen Kupferdrahtes, dessen Enden von a und b nach den Klemmen c und d geführt sind, wo sie mit der Doppelleitung in Verbindung stehen. PP ist die kreisrunde, papierdünne Eisenplatte, welche durch Aufschrauben des Holzstückes BB mittelst dreier Schrauben unverrückbar befestigt ist. Dieses Holzstück hat bei M eine trichterförmige Mündung, deren Hintergrund gegen die Eisenplatte hin eine kreisförmige Oeffnung besitzt. Der Durchmesser der letzteren ist etwa doppelt so gross als jener des Magnetstabes. Die Eisenplatte PP befindet sich nahe an dem Pole des Magneten, ohne ihn jedoch zu berühren. Zwei solche Telephone zusammen verbunden mittelst zweier von einander isolirter, aber meistens zusammen umsponnener Drahtleitungen bilden einen vollständigen Apparat. Spricht man mässig laut gegen die Platte des einen Telephons, während gleichzeitig ein anderer Beobachter das andere Telephon ans Ohr

hält, so hört derselbe mit vollständiger Deutlichkeit jedes Wort und erkennt sogar die Person des Sprechers an seiner Stimme. Dieselbe klingt wie aus weiter Ferne. Die Distanz der beiden Telephone kann dabei über 100 km betragen.

Zur Vorzeigung des Telephons im Hörsaale eignet sich das in Fig. 795 abgebildete Modell*), bei welchem alle Bestandtheile in grösserem Maassstabe ausgeführt und ersichtlich sind.

Die Construction des Bell'schen Telephons ist noch in mancherlei Weise verbessert und dadurch die Hörbarkeit gesteigert worden. Ausserdem sind mannigfache Nebenvorrichtungen erfunden worden, um an der Empfangsstation ein auf weiteren Umkreis hörbares Zeichen geben zu können. Solche „Rufapparate" sind entweder vom Telephon unabhängige telegraphische Signalapparate, oder es sind Vorrichtungen, welche am Telephon selbst stärkere Schallerregungen hervorbringen.

Fig. 795.

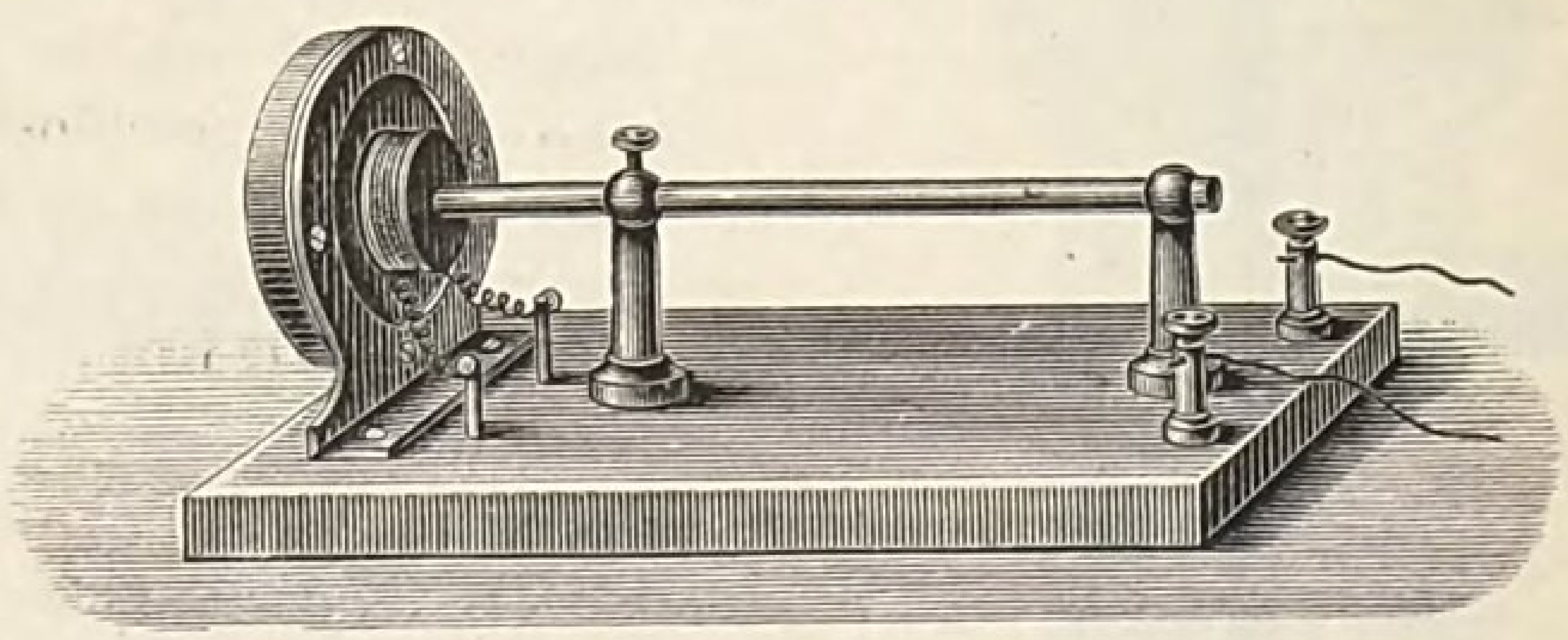


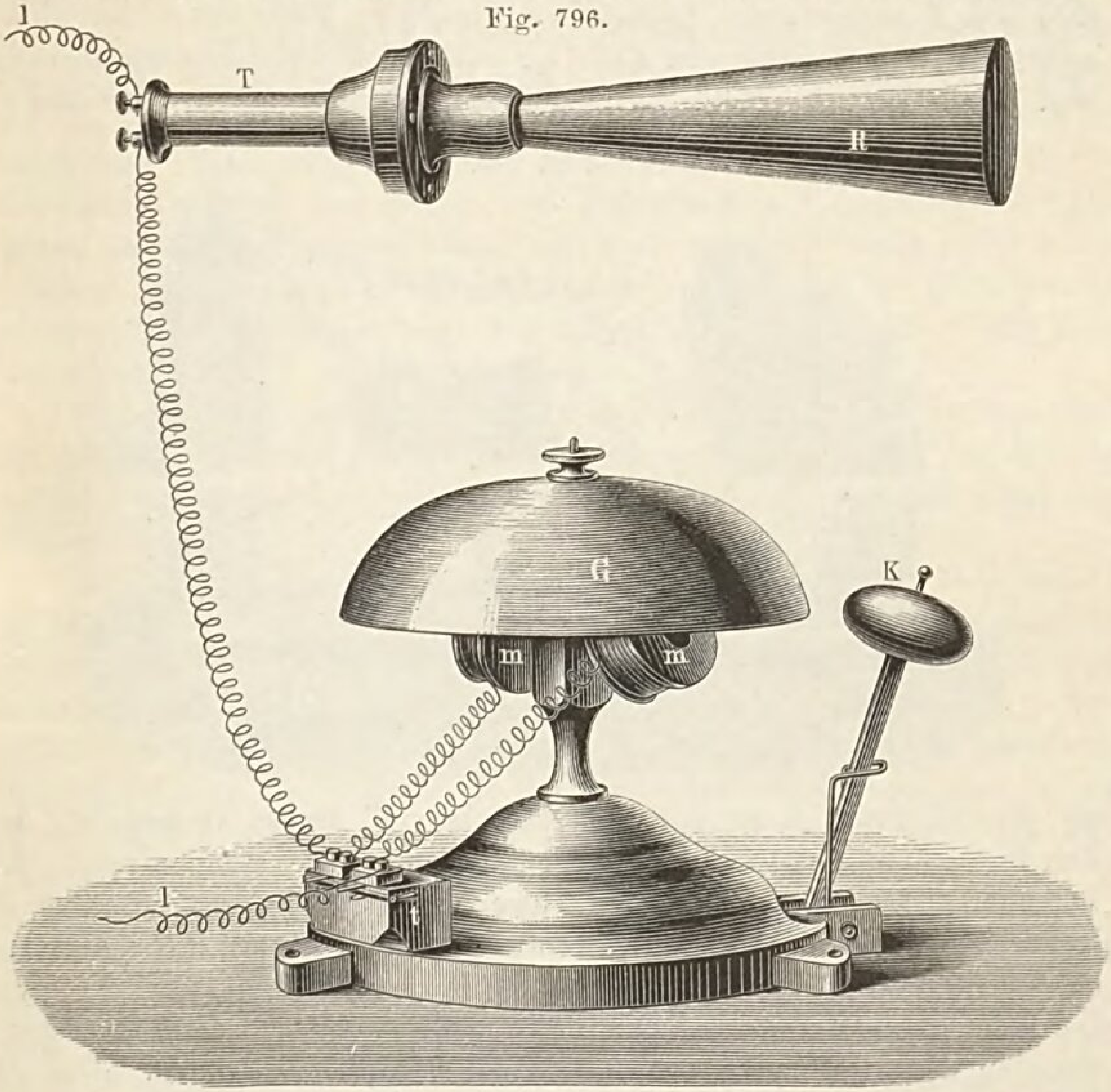
Fig. 796 zeigt einen solchen Rufapparat von A. Weinhold. Die stählerne Glocke *G* schwingt beim Anschlagen mit dem Hammer *K* mit zwei gegenüberliegenden Stellen ihrer Innenseite nahe vor den Enden eines bogenförmigen Eisenkerns *mm*, welche mit Inductionsspulen umgeben sind. Die hierdurch entstehenden kräftigen Inductionsströme werden durch Doppeldraht, oder durch einfachen Draht und Erdleitung dem entfernten Telephon *T* zugeführt, dessen Ton mittelst des aufgesetzten Resonators *R*, der auf die Tonhöhe der Glocke abgestimmt ist, verstärkt wird. Aug. Töpler verwendete statt der Glocke Stimmgabeln, von denen je eine bei den beiden Telephonen an Stelle der schwingenden Eisenplatte angebracht wurde. Am einfachsten ist der Rufapparat an den neueren vortrefflichen Hufeisen-Telephonen von Siemens und Halske. Er besteht aus einer kleinen Zungenpfeife, welche in die Mündung des Telephons gesteckt wird und welche beim Anblasen einen leichten gestielten Metallkörper auf der Eisenplatte vibrirend in Bewegung setzt. Der hierdurch an dem Empfangstelephon hervorgebrachte Ton ist bis in ein Nachbarzimmer deutlich vernehmbar und dient als

*) Nach Werner von Leybold's Nachfolger in Köln hergestellt. Auch F. Ernecke in Berlin liefert ein ähnliches Instrument nach Müttrich.

Aviso. Beim Sprechen wird dann die Zungenpfeife weggenommen. Bequem ist es, an jeder Station zwei Telephone hinter einander in die Leitung einzuschalten, wovon eines am Ohre, das andere vor dem Munde gehalten wird, um während des Sprechens auch hören zu können. Ueber die Theorie des Telephons sind eine grössere Anzahl von Abhandlungen erschienen, die wir hier übergehen müssen.

Von wissenschaftlichen Anwendungen des Telephons ist insbesondere hervorzuheben, dass dasselbe bei der Methode von F. Kohlrausch, die

Fig. 796.

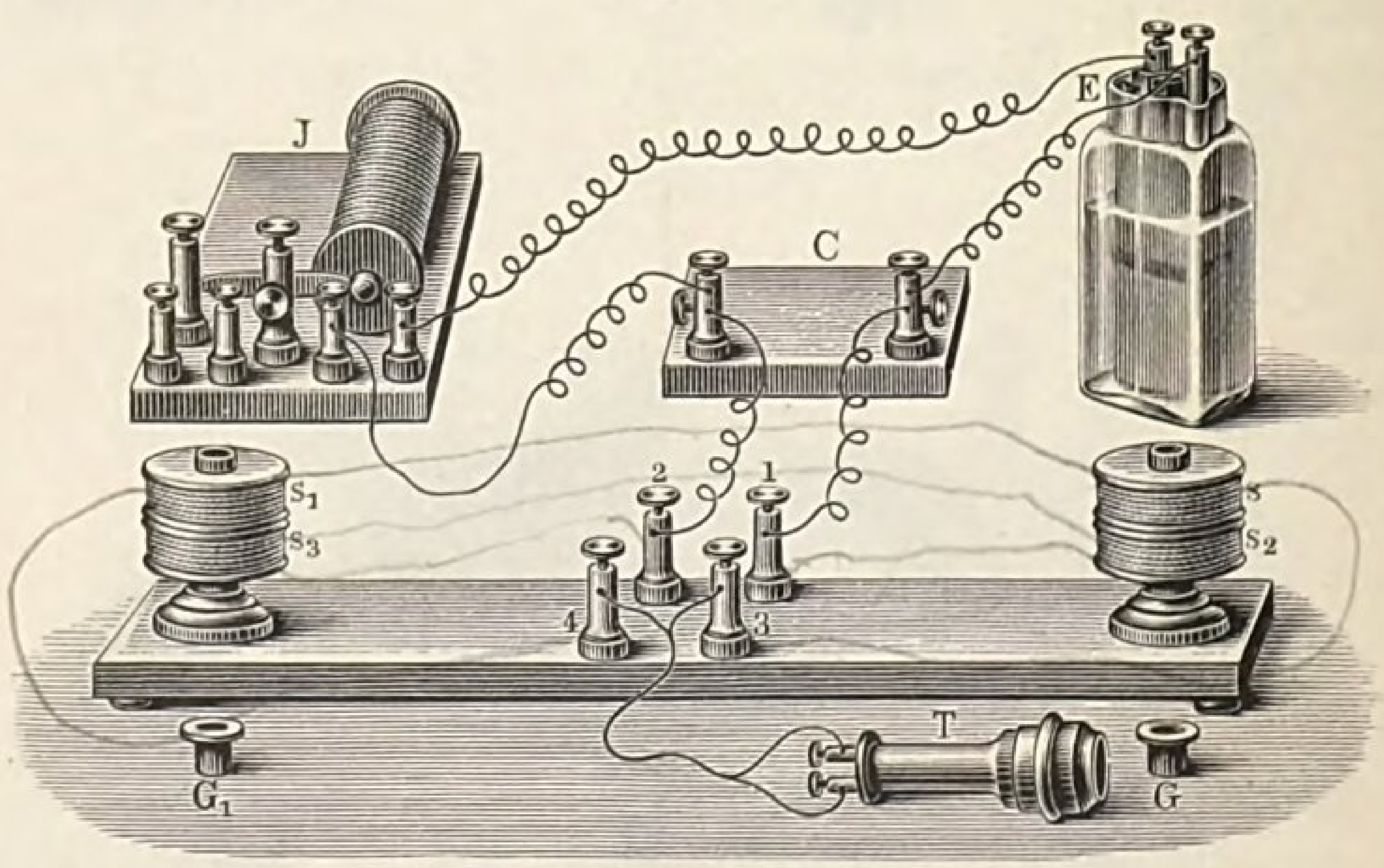


Widerstände von Flüssigkeiten mittelst Wechselströmen an der Wheatstone'schen Brücke zu messen (S. 475), an Stelle eines Elektrodynamometers in den Brückendraht eingeschaltet werden kann. Sobald durch den letzteren kein Strom geht, schweigt das Telephon. Selbstverständlich ist dasselbe auch bei der Messung der Widerstände fester Leiter verwendbar, vorausgesetzt, dass sie inductionsfrei gewickelt sind. Da die Selbstinduction auch bei bifilar gewickelten Drähten nie ganz zu unterdrücken ist, so kommt in diesem Falle das Telephon nicht ganz zum Schweigen; man stellt dann auf das Minimum der Tonstärke ein. Nach derselben Methode werden insbesondere auch Blitzableiterleitungen

geprüft, wozu von Nippoldt eine sehr compendiöse Telephonbrücke in Dosenform construirt wurde*).

Eine andere höchst interessante Verwendung findet das Telephon bei der Inductionswage von Hughes, Fig. 797. In den Strom des Elementes *E* (deren nach Umständen noch mehrere verbunden werden) sind der Selbstunterbrecher *J*, der Condensator *C* und die beiden gleichen primären Inductionsspiralen s_2 und s_3 eingeschaltet. (Die Verbindungsdrähte der Spiralen mit den Klemmen 1 und 2 und unter sich sind vom Fussbrette des Apparates verdeckt.) Zwei unter sich gleiche secundäre Inductionsspiralen *s* und s_1, welche auf den primären aufruhen, sind durch (in der Figur nicht sichtbare) Dräthe mit den Klemmen 3

Fig. 797.



und 4 und durch diese mit dem Telephon *T* derart verbunden, dass sich ihre Inductionsströme im Telephon gegenseitig compensiren. Das Telephon muss daher zunächst schweigen. Setzt man nun aber die Holzbecher *G*, G_1 in das Innere der Spiralen und legt in einen derselben einen leitenden Körper, z. B. eine Münze, so werden auch in dieser Inductionsströme geweckt, das Gleichgewicht der sich compensirenden Spiralen wird gestört und es beginnt das Telephon zu tönen. Dasselbe tönt auch, wenn in beide Spiralen Münzen gelegt werden, falls dieselben sich durch Gewicht, Legirung oder auch nur durch ihre Lage zu den Windungen unterscheiden. Besser leitende Metalle wirken stärker, am stärksten Eisen.

A. Oberbeck und J. Bergmann**) haben die Inductionswage zur Messung der relativen Leitungsfähigkeit verschiedener Metalle und des Quecksilbers benutzt, indem sie dieselben in Form cylindrischer

*) Siehe das Preisverzeichniss von Hartmann u. Braun, 1888, S. 30, 31 u. 34.

**) Wiedem. Ann. XXXI, S. 792 (1887).

Platten von wechselnder Dicke aber gleichem Durchmesser zwischen die Inductionsrollen setzten. Sie bedienten sich hierbei statt des Telephons des Elektrodynamometers. Eine eingehende Theorie des Instrumentes ist von Oberbeck gegeben worden*).

Mikrophon, Mikro-Tasimeter. Das Bell'sche Telephon hat 241
den Nachtheil, dass es von der ohnehin sehr geringen Menge elektrischer Energie, die es aufnimmt, nur einen kleinen Bruchtheil an den Empfänger abgiebt, da, insbesondere bei weiteren Entfernungen, der grösste Theil der Energie in Wärme verwandelt wird. Man ist daher zum Theil wieder auf die ursprüngliche Idee von Reis zurückgekommen, nach welcher der durch den Schall erregte Apparat die elektrische Energie nicht selbst zu erzeugen, sondern nur einen von galvanischen Elementen erzeugten Strom zu modificiren hat. Dabei soll aber der Strom nicht völlig unterbrochen, sondern nur seine Intensität durch Aenderungen des Widerstandes rythmisch modificirt werden. Als Empfänger wird das Bell'sche Telephon beibehalten.

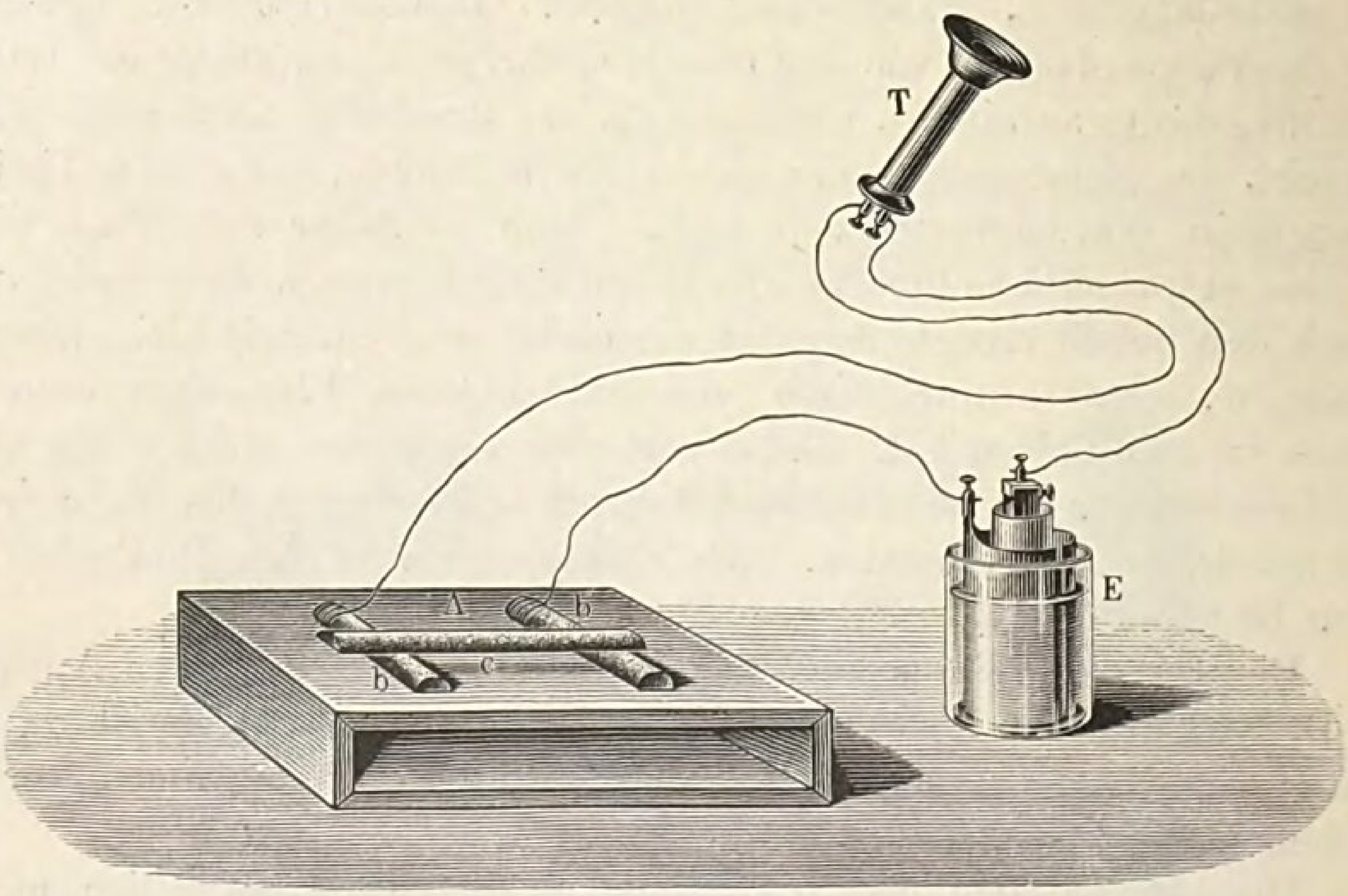
Der Erfinder dieses zuerst Universaltelephon genannten Apparates ist D. Robert Lüdtge in Berlin (Januar 1878). Doch ist dasselbe später von Hughes neuerdings selbstständig erfunden und unter dem Namen Mikrophon bekannt geworden.

Die Construction des Mikrophons variirt ausserordentlich und ist im Allgemeinen von verblüffender Einfachheit. Fig. 798 (a. f. S.) zeigt ein solches, wie man es mit den einfachsten Mitteln herstellen kann. Auf ein hölzernes Kästchen A, welches als Resonanzboden wirkt, legt man zwei Stäbe von einem beliebigen Leiter, z. B. ein Paar Nägel, am besten ein Paar Stäbe von harter Gaskohle b, b' und quer darüber ein eben solches drittes Stäbchen c. b und b' verbindet man mit den Drähten des Telephons T und schaltet irgendwo in die Leitung ein Element E ein. So lange das Kästchen A vollständig unerschüttert bleibt, was nur dann der Fall ist, wenn die Umgebung in lautloser Stille erhalten wird, bleibt auch der Widerstand an den Contactstellen der Stäbchen gleich gross und der Strom von constanter Stärke. In diesem Falle wird am Telephon Nichts gehört. Die leiseste Berührung des Brettchens A, das Darüberschreiten einer Fliege, das Sprechen in seiner Nähe u. s. f., verursacht Schwingungen der Stäbe, welche die Contactstellen in der Weise afficiren, dass daselbst der Uebergangswiderstand im nämlichen Rythmus geändert wird, in welchem die Schwingungen des Schalles erfolgen. Hierdurch wird also auch die Stromstärke im Draht geändert, hierdurch die Stärke des Magnetismus im Telephon und hierdurch das Eisenplättchen in Schwingungen versetzt, welche sich der benachbarten Luft mittheilen. Die hierbei auftretenden Geräusche des Telephons sind meistens viel lauter als diejenigen, welche von einem Telephon in einem

*) Ebend. S. 812 (1887).

andern hervorgerufen werden, weil begreiflicher Weise die Stromänderungen viel bedeutender sind. Es gelingt aber nicht so sicher die getreue Wiedergabe der Klangfarbe und des Charakters der Schalleindrücke der Aufgabestation. Um dies eher zu erreichen, empfiehlt es sich, den

Fig. 798.



Druck, mit welchem die Stäbchen sich berühren, regulirbar zu machen. Fig. 799 zeigt ein hierzu geeignetes Mikrophon von A. Weinhold in halber Grösse. Auf dem Resonanzbrettchen A ist zunächst ein messingenes Scharnier S und auf diesem ein isolirendes Säulchen aus Siegellack oder Holz BB befestigt. Letzteres trägt die circa 4 cm langen Querbalken von Gaskohle b, b'. Das dritte verticale Kohlenstäbchen c ist durch ein Loch des oberen horizontalen Stäbchens hindurchgesteckt und ruht mit seiner Spitze in einer Vertiefung des unteren. Die Drahtverbindung ist wie bei Fig. 798. Durch Neigen des Säulchens BB regulirt man den Druck des verticalen Stäbchens auf seine Unterlage, bis der Apparat eben am besten fungirt, was nur durch Versuche zu ermitteln ist.

Fig. 799.

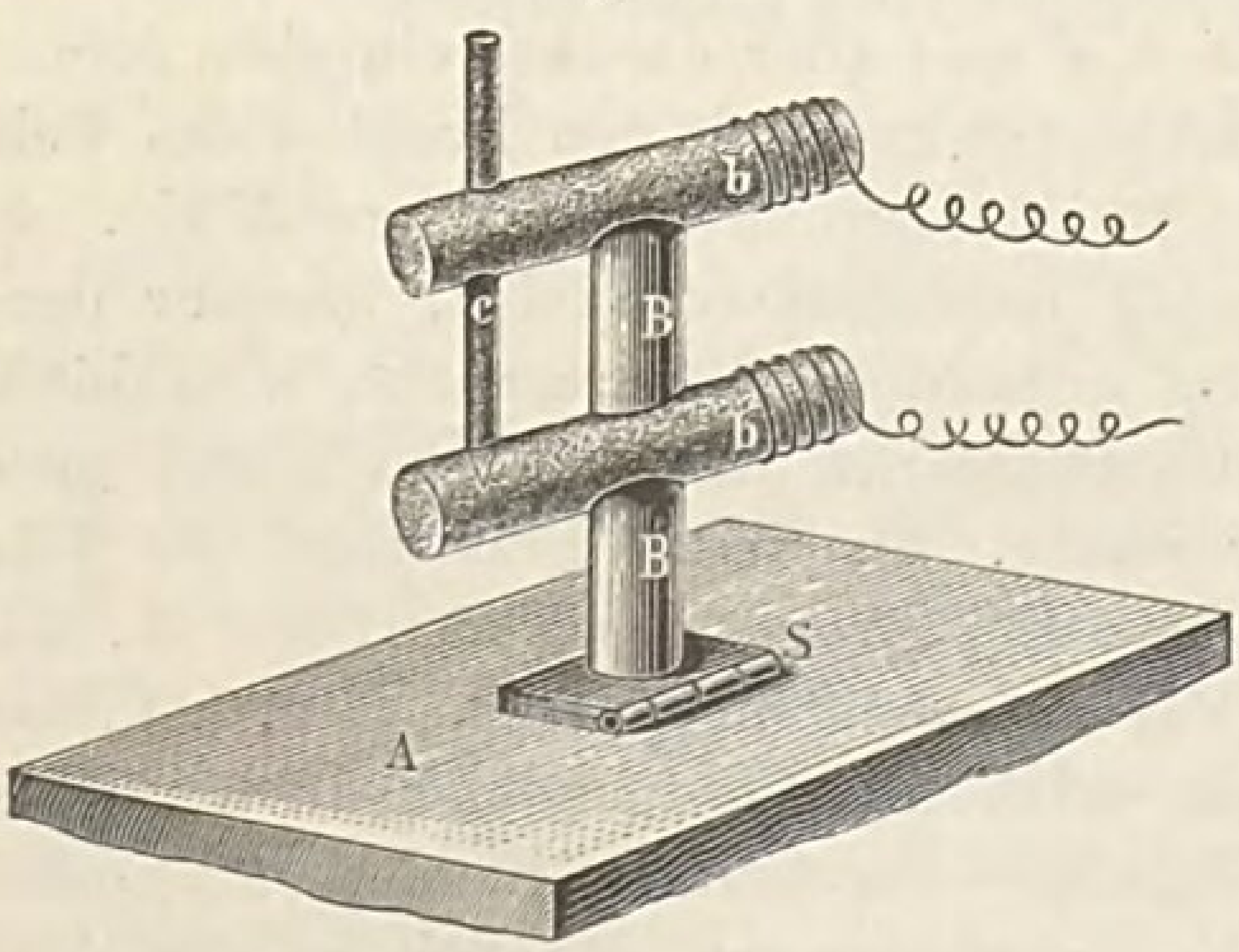
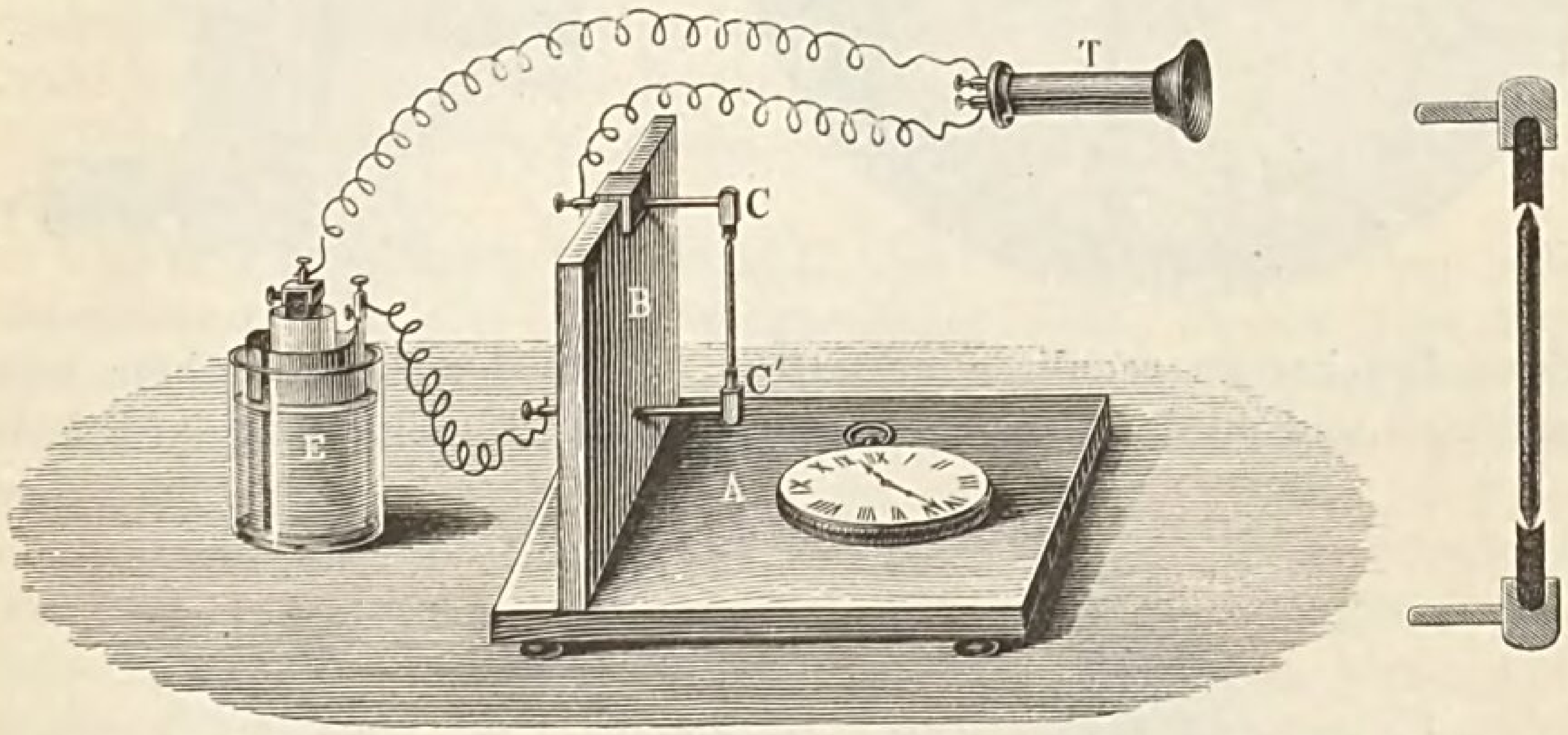


Fig. 800 zeigt das Mikrophon im Wesentlichen, wie es von Hughes construirt wurde. Das verticale Kohlenstäbchen ruht mit seinen zwei Spitzen in Lagern von Kohle C, C', welche mit dem verticalen Resonanz-

brette *B* durch horizontale metallene Arme verbunden sind. Das Weitere ist aus der Figur verständlich.

Eine weitere Verbesserung des Apparates, besonders wenn es sich um Uebertragungen auf grössere Distanzen handelt, hat man durch Einschaltung eines Inductionsapparates erreicht. Der Strom des Elementes geht nämlich von dem einen Pole durch das Mikrophon und durch die primäre Spirale einer Inductionsspule zum anderen Pole zurück. Die Enden der viel mehr Windungen enthaltenden secundären Spirale werden mit der Doppelleitung verbunden, welche zum Telephon der Empfangsstation führt. Man begreift, dass, da der Stromkreis an der Aufgabestation nur einen kleinen Widerstand zu haben braucht, schon geringfügige Aenderungen im Contact starke Stromschwankungen ergeben. Die dadurch in der secundären Spirale hervorgerufenen Inductions-

Fig. 800.



ströme entstehen durch eine hinlänglich grosse elektromotorische Kraft, um selbst durch den grossen Widerstand einer längeren Leitung nicht zu sehr geschwächt zu werden. Dass dabei der Rythmus, also auch die Tonhöhe, im Wesentlichen unverändert bleibt, erklärt sich mit Rücksicht auf das, was wir im §. 239 über die Inductionsströme zweiter Ordnung gesagt haben. Die Klangfarbe muss freilich einige Aenderung erleiden, doch ist es auf diese Weise gelungen, Musikaufführungen auf weite Strecken hörbar zu übertragen. Die meisten jetzt im Gebrauche befindlichen Fernsprechanlagen sind nach diesem Principe ausgeführt.

Wir geben nachstehend die Abbildung und Beschreibung des von der Firma „Mix und Genest“ in Berlin construirten aufrechtstehenden Mikrophons, das für den deutschen Fernsprechverkehr als Aufgeber eingeführt ist, Fig. 801 und 802 (a. f. S.). Wir haben daran folgende Bestandtheile: *R* ein gusseiserner Rahmen mit 4 Schrauben r_1 bis r_4 zur Befestigung des Mikrophons an dem Apparatkasten; *M* eine in Gummiband gelagerte dünne Platte von trockenem Tannenholz, welche die Schallschwingungen aufzunehmen hat; *bb* zwei Kohlenbalken, die als Lager für die cylindri-

schen Kohlenstäbchen k, k, k dienen, welch letztere mittelst der Blattfeder f und der dazwischen gelagerten Filzplatte d an die Holzplatte angedrückt werden. s und s_1 sind zwei Schrauben, welche die Stärke

Fig. 801.

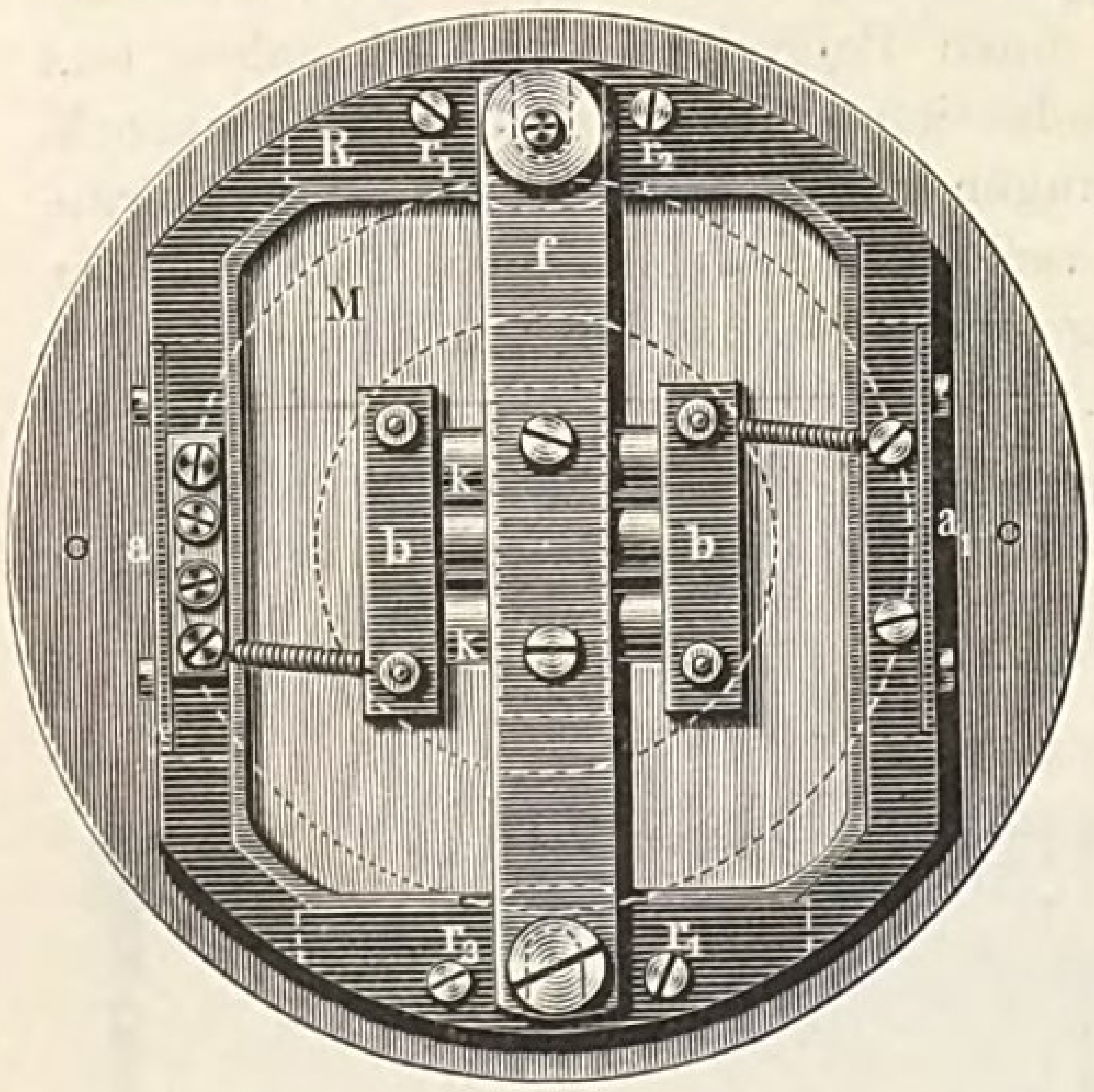
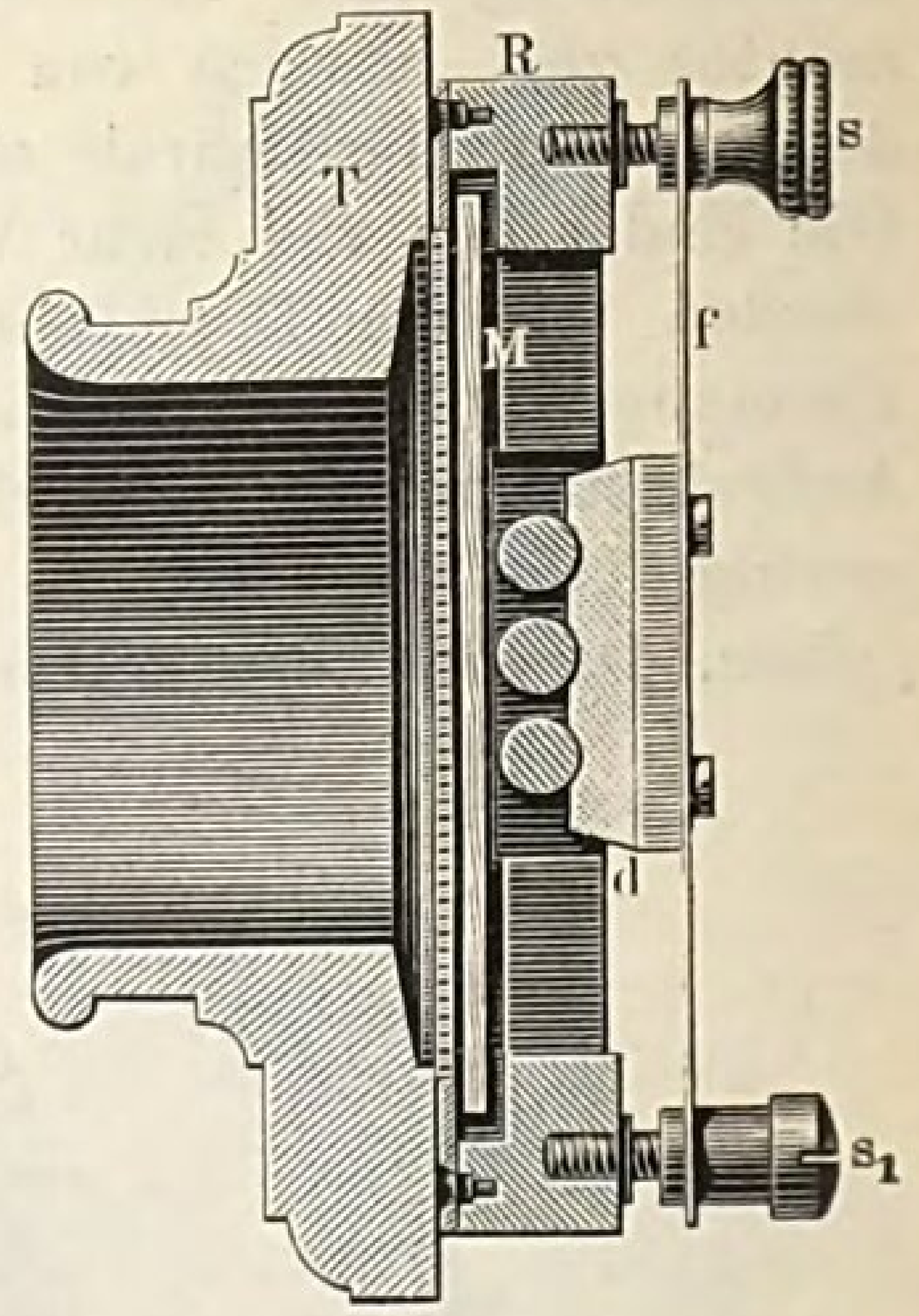
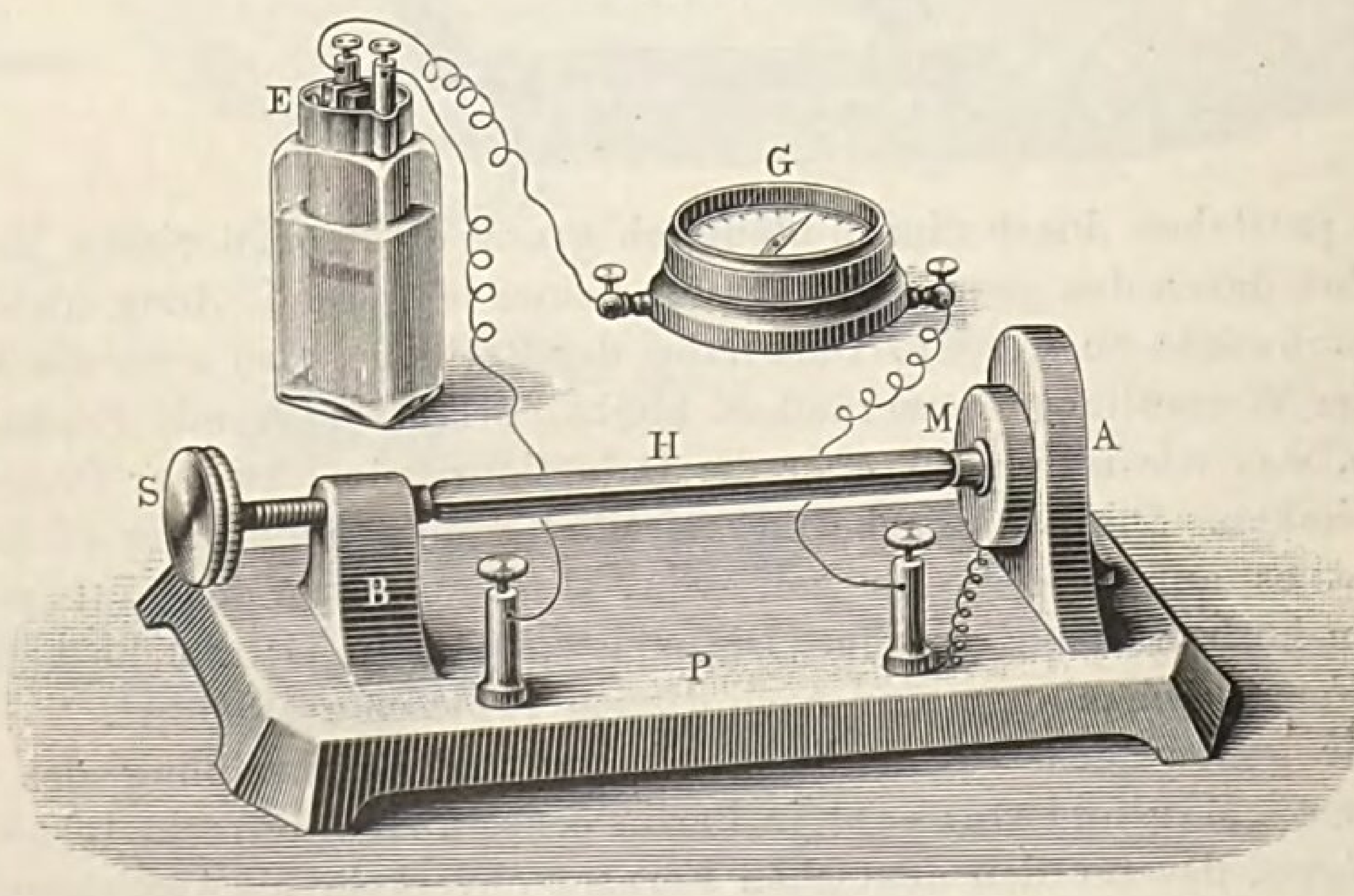


Fig. 802.



dieses Druckes zu reguliren gestatten. T ist der Sprechtrichter und endlich a und a_1 sind die Contactschrauben zur Einschaltung des Mikro-

Fig. 803.



phons in den primären Stromkreis. Das Ganze ist an der Thüre eines Kästchens befestigt, in welchem die Inductionsrolle Platz findet und an welchem auch die elektrische Signalvorrichtung und das Telephon zum Empfange der Nachrichten von der anderen Station angebracht zu werden pflegen.

Das Mikrophon kann auch sonst Verwendung finden, um leise Erschütterungen (Erdbeben) nachzuweisen; eine interessante Anwendung findet es in Edison's Mikro-Tasimeter, von welchem Fig. 803 eine Abbildung giebt*). Auf einer metallenen Fussplatte erheben sich zwei angegossene Träger *A* und *B*. Der Träger *A* ist mit einer mikrophonischen Einrichtung versehen, welche an der nach *B* gerichteten Seite die Metallplatte *M* mit einer Vertiefung trägt. Eine ebensolche Vertiefung besitzt das Ende der Schraube *S*. Zwischen beide Vertiefungen können Stäbchen *H* von Hartgummi oder Gelatine eingelegt werden. Der Strom eines Elementes *E* geht durch das Galvanometer *G* auf die Platte *M*, von dort durch das Mikrophon nach *A* und *P* und zum Elemente zurück. Bei der geringsten Erwärmung dehnt sich das Hartgummistäbchen aus, drückt dadurch auf das Mikrophon, verbessert dort den Contact und vermindert dadurch den Widerstand, in Folge dessen die Nadel einen grösseren Ausschlag giebt. Bei Anwendung des Gelatinestäbchens bewirkt Zunahme der Luftfeuchtigkeit, wie sie durch in die Nähe gelegtes befeuchtetes Papier hervorgerufen wird, ebenfalls eine Verlängerung und in Folge dessen einen Nadelausschlag.

Das Phänomen von Hall. Wir haben gezeigt, dass jeder durchströmte Leiter in einem magnetischen Felde, dessen Kraftlinien nicht dem Leiter parallel sind, einen Bewegungsantrieb erfahre. Es fragt sich jetzt darum, ob diese Kraftwirkung sich nur auf den Leiter selbst erstreckt, oder ob sie verursacht oder doch begleitet ist durch eine Action auf die Elektricität des Stromes selbst. Versuche, welche hierüber von v. Feilitzsch**) (1858), Mach***) (1870) und Gore†) (1874) angestellt wurden, haben ergeben, dass eine solche directe Einwirkung des magnetischen Feldes auf die bewegte Elektricität nicht stattfinde, sondern dass die bewegende Wirkung nur auf die durchströmten Leiter erfolge. 242

Mach liess durch ein auf eine Ebonitplatte geklebtes, dünnes, kreisförmiges Silberblatt mittelst zweier diametral gegenüber liegender Stanniolelektroden einen kräftigen Strom fliessen; das Silberblatt war mit einer Lösung von Wachs in Aether übergossen und man erhielt 1 bis 2 Secunden nach dem Durchleiten des Stroms als Curven gleicher Stromstärke Lemniscaten, indem das Wachs an den Stellen, wo der Strom gleich viel Wärme entwickelte, gleich schnell schmolz. Wurde die Platte mit ihrer Ebene äquatorial zwischen die Pole eines Elektromagnets gestellt, so war keine Aenderung der Curven zu bemerken. Auch wenn

*) Dieselbe ist dem Preisverzeichnisse von Leybold's Nachfolger in Köln entnommen.

**) Fernwirkungen S. 743.

***) Carl's Repert. 6, S. 10.

†) Phil. Mag. (4) LVIII, S. 393.

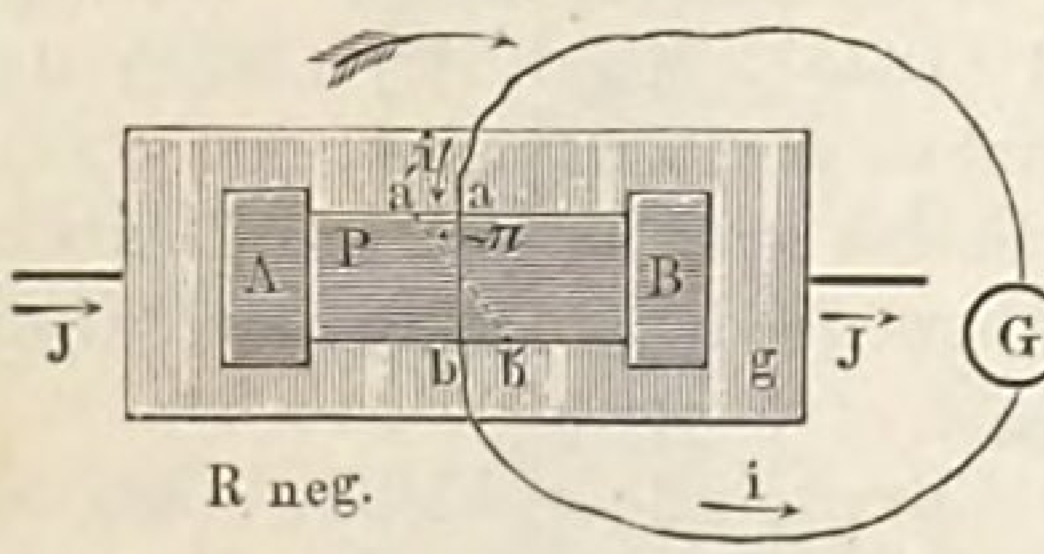
man die zu einem Multiplicator führenden Drähte an zwei so gelegenen Stellen der durchströmten Platte aufsetzte, dass die Nadel des Multiplicators keinen Strom anzeigte (äquipotentiale Stellen), trat kein Ausschlag der Nadel, also auch keine Ablenkung der Stromfäden auf, wenn man die Platte der Einwirkung magnetischer Kräfte unterwarf.

Gore liess einen starken Strom durch einen Draht fliessen, welcher sich an einer Stelle verzweigte und beide Zweige des Drahtes zur Weissgluth brachte; er versuchte dann durch Einwirkung des Magnetismus auf die Verzweigungsstelle den Strom von dem einen Zweig in den anderen zu drängen, jedoch ohne Erfolg.

Im Gegensatze zu diesen negativen Resultaten hat E. H. Hall*) (1879) in Baltimore eine Erscheinung beobachtet, welche eine Ablenkung der Stromlinien durch den Magnetismus zu beweisen schien. Es sei jedoch hier gleich bemerkt, dass nach dem jetzigen Stande unserer Kenntnisse eine thatsächliche Ablenkung der Strömungslinien nicht wohl anzunehmen ist, sondern dass das nach Hall benannte Phänomen seine Entstehung einer eigenthümlichen Veränderung zu verdanken scheint, welche die magnetischen Kräfte in den vom galvanischen Strom durchflossenen Leitern hervorbringen.

Hall verwendete bei seinen ersten Versuchen ein äusserst dünnes, rechteckiges Goldblatt (9 cm lang, 2 cm breit) P (Fig. 804), das auf eine Glasplatte g geklebt und durch welches mittelst aufgelegter Messingstreifen A, B ein galvanischer Strom J geleitet wurde. An den gegenüberliegenden Rändern des Goldblatts wurden zwei Stellen a und b gesucht, welche äquipotential waren, so dass ein mit diesen Punkten verbundenes Spiegelgalvanometer G (von kleinem Widerstand) keinen Strom anzeigte; die Platte P befand sich zwischen den Flachpolen eines Elektromagnets, der durch einen besonderen Strom erregt werden konnte. Das magnetische Feld, in welchem dann die Platte stand, war nahe homogen und die Kraftlinien des Feldes schnitten das Goldblatt rechtwinklig.

Fig. 804.



Bei Erregung des Elektromagnets erhielt Hall einen dauernden Strom i, dessen Richtung sowohl bei Umkehrung der Stromrichtung von J, als auch bei Umkehrung der Magnetisirung in die entgegengesetzte überging. Fliesst der durch das Goldblatt geleitete Strom J (Primärstrom) im Sinne des Pfeiles der Figur und befindet sich vor der Platte der Nord-, hinter derselben der Südpol des Magnetes, so hat der derivirte Strom i (Hall'scher Strom) die Richtung des kleinen Pfeiles i der Figur. Die Aequipotentiallinien im Goldblatt sind demnach durch

*) Americ. Journal of Math. vol. II; Phil. Mag. (5), IX, S. 225.

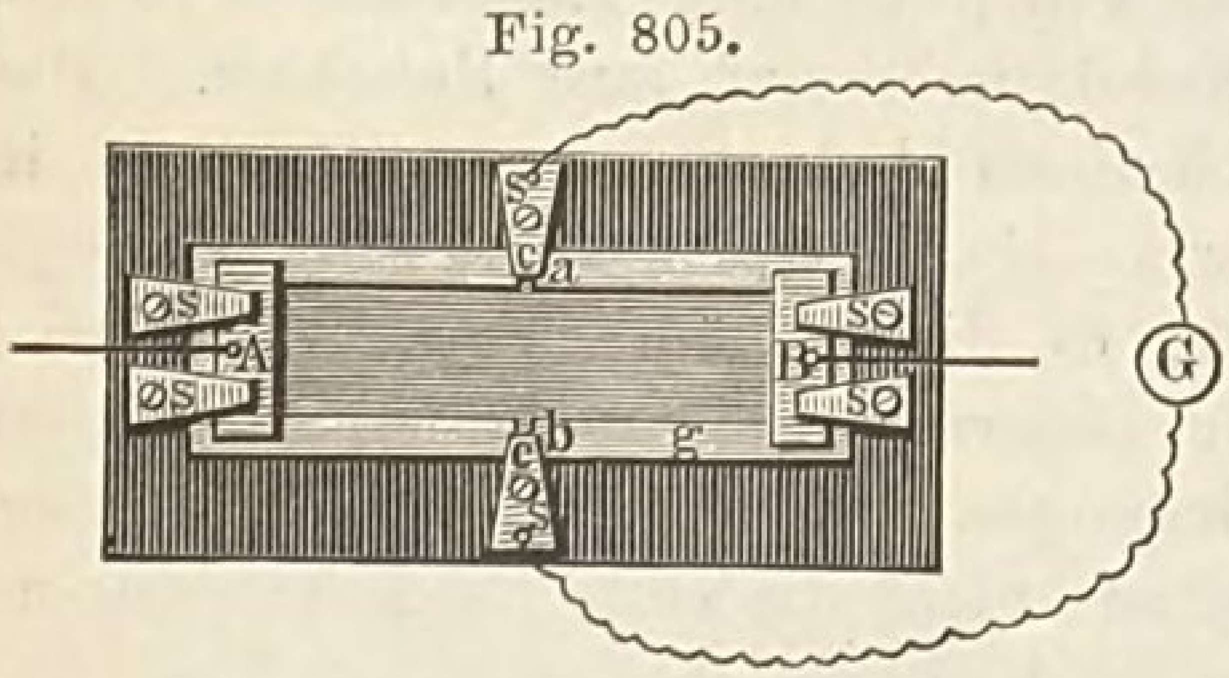
die Wirkung der magnetischen Kraft gedreht worden, so dass die vor der Wirkung des Magnetismus durch a und b gehende Aequipotentiallinie in die Lage $a'b'$ gelangt, also im Sinne des Pfeiles π gedreht ist. Diese Drehung ist entgegengesetzt der Richtung der Ströme, welche nach Ampère's Theorie das magnetische Feld ersetzen können; der gefiederte Pfeil deutet die Richtung der „Feldströme“ an. In derselben Weise wie in einem Goldblatt tritt der Hall'sche Strom in einer dünnen Platte von Silber, Platin, Nickel etc. auf, dagegen ist er entgegengesetzt gerichtet bei Eisen, Kobalt, Antimon etc. Hall fand, dass für ein und dasselbe Metall die elektromotorische Kraft e der transversalen Wirkung in der Leitung $a\,G\,b\,a$ proportional ist der Intensität des Stromes J und nahe proportional der Stärke des magnetischen Feldes M; sie ist ferner um so grösser, je geringer die Dicke δ der Platte ist, von der Breite derselben erscheint sie dagegen (bei gleichem J) unabhängig. Hall setzt also:

$$e = R\,\frac{JM}{\delta},$$

wo R eine für das betreffende Metall charakteristische Grösse ist; er nennt sie das Drehungsvermögen (*Rotatory power*) und bezeichnet sie positiv bei denjenigen Substanzen, wo die Drehung der Aequipotentiallinien im Sinne der Feldströme erfolgt (Fe, Co, Sb etc.), dagegen negativ bei den übrigen (Au, Ag, Pt, Ni etc.). Bei einer Substanz mit positivem R gelangt man also von der Eintrittsstelle des Stromes J in die Platte zur Eintrittsstelle des Hall'schen Stromes i in dieselbe durch eine Bewegung entgegengesetzt der Richtung der Feldströme. Wird die Platte derart ins magnetische Feld gebracht, dass ihre Ebene den magnetischen Kraftlinien parallel ist, so erhält man keine Wirkung.

Hall gab den zu untersuchenden Platten P die Gestalt eines Kreuzes (Fig. 805), mit dessen kurzen Armen a und b die zum Galvanometer G führenden Drähte durch aufgedrückte Messingstücke c, c in Contact standen, während die Messingstücke A und B auf den Enden der langen Kreuzesarme auflagen; s sind Schrauben, welche die Contactstücke auf die Platte P, welche selbst wieder auf einer Glasplatte g liegt, pressen. Durch vorsichtiges Abschaben der Platte in der Nähe der Arme a und b kann man den Strom in G ganz oder nahe zum Verschwinden bringen. Bei dieser Anordnung, wo die Elektroden des Primärstromes die kurzen Seiten der Kreuzplatte berühren, darf aber das Verhältniss der Breite zur Länge der Platte nicht über eine gewisse Grenze (etwa 1:2) steigen, weil sonst die transversale elektromotorische Kraft e sich theilweise längs der Primär-Elektroden ausgleicht. Man kann den Platten auch

Fig. 805.



halbkreisförmige oder kreisförmige Gestalt geben, indem man die Platte längs der halben resp. längs der ganzen Kreisperipherie mit einer Elektrode (dickes Kupferblech) versieht, während die andere Elektrode sich im Centrum der Platte befindet.

Die Elektroden für den Hall'schen Strom (Hall-Elektroden) kann man bei der Halbkreis-Platte an den radialen Begrenzungslinien, äquidistant vom Centrum, anbringen; bei der kreisförmigen Platte lässt sich die Hall'sche Wirkung erhalten, indem man die Platte längs eines Radius aufschneidet und die Hall-Elektroden zu beiden Seiten des schmalen Schlitzes einander gegenüber (etwa in der Entfernung des halben Radius vom Centrum) anbringt. Die Fig. 806 und 807 stellen die eben beschriebenen Fälle dar; *P* ist die Platte, *A* und *B* sind die Primär-, *a* und *b* die Hall-Elektroden *).

Um mit beliebig gestalteten Platten zu experimentiren, verwendete Righi **) das Differentialgalvanometer, indem er die Platte mit drei

Fig. 806.

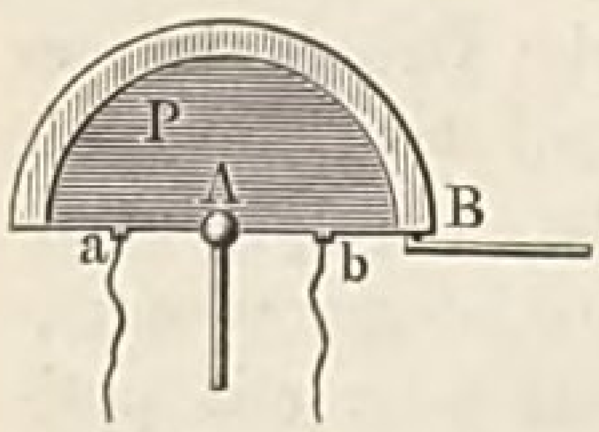


Fig. 807.

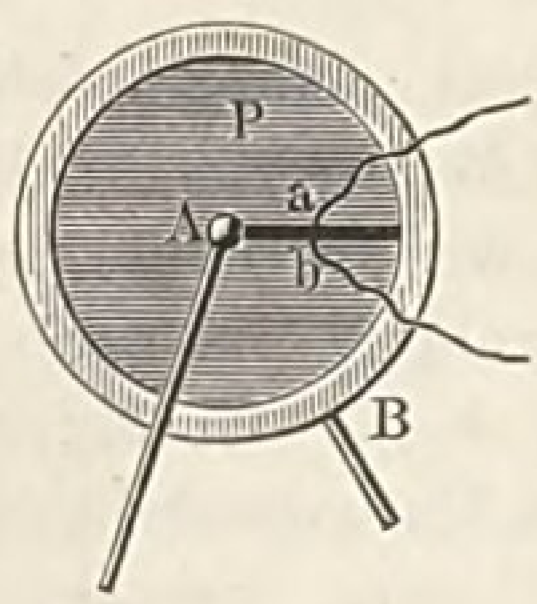
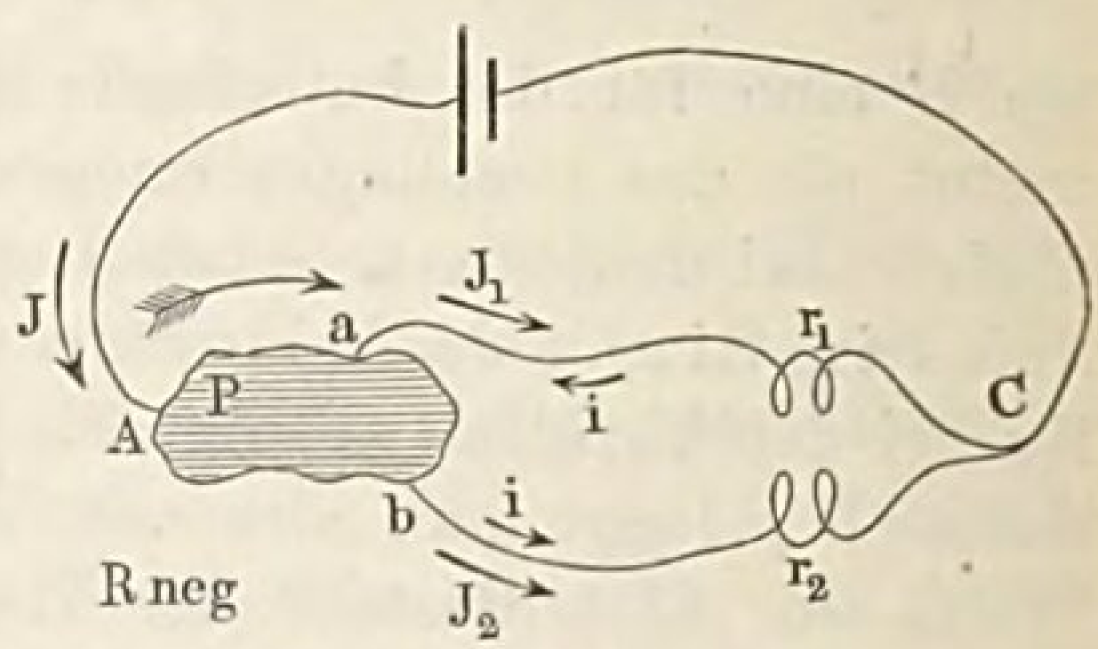


Fig. 808.



punktförmigen Elektroden versah, bei deren einer (Fig. 808) *A* der Primärstrom *J* in die Platte eintritt, während er sie bei den zwei anderen *a* und *b* verlässt (J_1 und J_2). Von diesen zwei Stellen führen die Leitungen zu den Rollen r_1 und r_2 eines Differentialgalvanometers und man bringt nun durch Einschaltung von passenden Widerständen in den einen oder anderen Zweig die Nadel nahe auf ihre Ruhelage. Das Hall'sche Phänomen äussert sich dann dadurch, dass der Strom in einer Rolle, z. B. r_2, verstärkt, in der anderen r_1 geschwächt wird, wodurch die Galvanometernadel ausschlägt; es fliesst nämlich der Hall'sche Strom *i* durch die beiden Rollen des Differentialgalvanometers in gleicher Richtung, so dass sich seine Wirkungen auf die Nadel unterstützen. Man erhält jedoch bei dieser Methode nicht die volle elektromotorische Kraft der Hall'schen Wirkung, welche die Platte (bei gleichem *J* und *M*) geben kann, sondern nur die Hälfte ***).

Bei den meisten Metallen hat das Drehungsvermögen *R* nur kleine Werthe, daher die transversale elektromotorische Kraft gering ist, und man muss sehr dünne Platten anwenden, um deutliche Wirkungen am

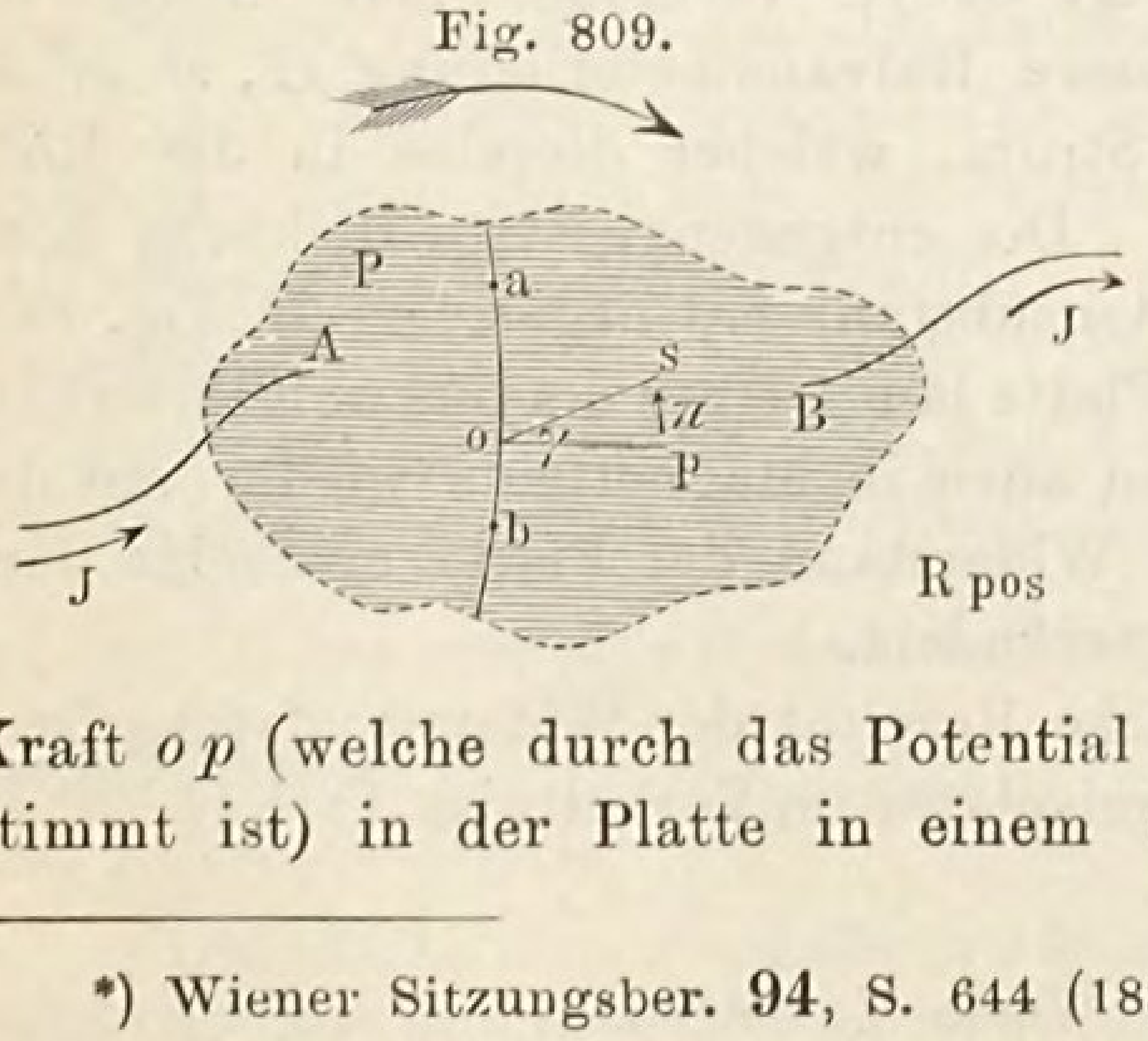
*) v. Ettingshausen u. Nernst, Wiener Sitzungsber. 94, S. 560, 1886.
**) Mem. d. Acc. di Bologna (4), V, 1883; Exner's Rep. 20, S. 825, 1884.
***) v. Ettingshausen, Wiener Sitzungsber. 94, S. 808, 1886.

Galvanometer zu erhalten. Sehr stark tritt dagegen, wie Righi (1883) beobachtete, das Hall'sche Phänomen im Wismuth auf, die stärkste Wirkung unter allen bisher untersuchten Substanzen zeigt aber, wie v. Ettingshausen und Nernst fanden, das Tellur. Mit einer dünnen Wismuthplatte konnte Righi schon durch die Einwirkung eines magnetisirten Stahlstabes die Erscheinung sehr gut beobachten, ja selbst der Magnetismus der Erde brachte deutlich die Hall'sche Wirkung hervor. Wismuth hat ein negatives, Tellur ein positives Drehungsvermögen.

v. Ettingshausen und Nernst stellten experimentell fest, dass man die volle elektromotorische Kraft, wie bei der Anordnung Hall's erhält, wenn man vier punktförmige Elektroden an beliebigen Stellen des Randes einer Platte anbringt und dieselben alternirend als Primär- und Hall-Elektroden verwendet; dabei ist die Gestalt der Platte — gleichförmige Dicke derselben vorausgesetzt — ohne Einfluss. Ferner bleibt die elektromotorische Kraft die gleiche, wenn man die Primär- und Hall-Elektroden paarweise mit einander vertauscht.

Theoretisches über das Hall'sche Phänomen; weitere 243
Experimente. Die im vorigen Paragraphen angegebenen Resultate sind von Boltzmann*) auf theoretischem Wege abgeleitet worden, indem derselbe von den allgemeinen Gleichungen Maxwell's ausging, welche er in ähnlicher Weise, wie schon Rowland und Lorentz, auf die Elektricitätsbewegung in einer ebenen, gegen die Kraftlinien eines magnetischen Feldes senkrecht gestellten Platte anwendete. Aus diesen Gleichungen ergiebt sich, dass in einer unbegrenzten Platte die Aequipotentiallinien durch den Magnetismus keine Veränderungen erfahren, dass aber die Stromlinien (d. h. die Linien, welche an jeder Stelle die Richtung angeben, in der die Elektricität fliesst) um einen gewissen kleinen Winkel γ gedreht werden, so dass sie nicht mehr mit den auf den Aequipotentiallinien senkrechten Transversalen zusammenfallen; die trigonometrische Tangente dieses Winkels γ ist durch das Product aus dem Drehungsvermögen R, der magnetischen Feldintensität und der elektrischen Leitungsfähigkeit $\varkappa$ des Plattenmaterials gegeben. Für eine Substanz mit positivem Drehungsvermögen (Te, Sb, Fe, ..) findet im magnetischen Felde die Verdrehung einer Stromlinie os (Fig. 809), die Platte unbegrenzt gedacht, gegen die Richtung der elektromotorischen Kraft op (welche durch das Potential der elektrostatischen Ladung bestimmt ist) in der Platte in einem den Ampère'schen Feldströmen

Fig. 809.



*) Wiener Sitzungsber. 94, S. 644 (1886).

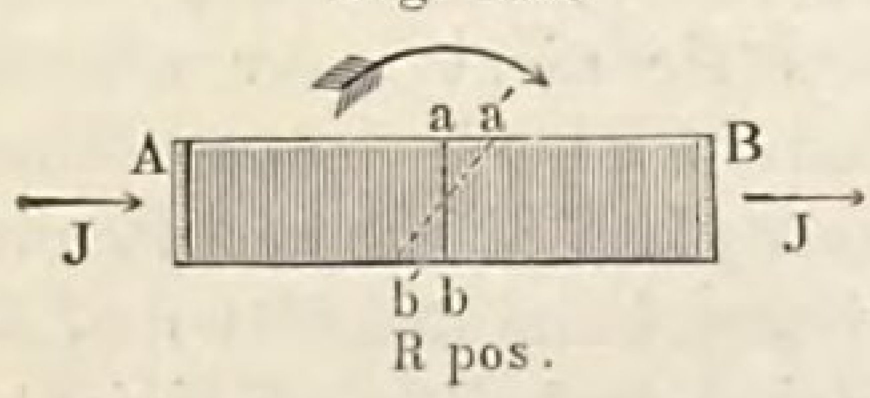
(gefiederter Pfeil) entgegengesetzten Sinne statt (Pfeil π). Werden die Werthe des Potentials an den beiden Primär-Elektroden A und B unverändert erhalten, so wird durch die Einwirkung des Magnetismus der Potentialwerth an keinem Punkte der Platte geändert; waren daher zwei beliebige Punkte der Platte, z. B. a und b, ursprünglich äquipotential, floss also durch eine sie verbindende äussere Leitung kein Strom, so ist dasselbe auch nach Wirkung des Magnetismus der Fall.

Dies tritt z. B. bei einer kreisförmigen, unaufgeschnittenen Platte, welche eine centrale und eine peripherische Elektrode besitzt, ein (wie Fig. 807, S. 920, aber ohne den radialen Schlitz); nach der Theorie werden die Stromlinien, welche ursprünglich mit den Plattenradien zusammenfallen, durch die magnetische Wirkung in eigenthümliche (logarithmische) Spiralen verwandelt. Der Widerstand der Kreisplatte zwischen A und B erscheint — nach Boltzmann — durch die Hall'sche Wirkung im Verhältniss $1:1 + h^2$ vergrössert, wo

$$h = tang\ \gamma = RMK^{*}).$$

Anders aber ist das Verhalten, wenn eine Platte einen freien Rand hat, d. h. einen solchen, durch welchen keine Elektricität hindurchfliessen kann, wo also stets die Bedingung besteht, dass er Strömungslinie sein muss. Für diesen Fall ergiebt die Theorie, dass in der Nähe des Randes die Aequipotentiallinien gerade in der entgegengesetzten Weise gedreht werden, als es in der unbegrenzten Platte mit den Stromlinien der Fall ist. Hieraus folgt für eine schmale und lange rechteckige Platte, welche mit ausgedehnten Primär-Elektroden A, B längs der kurzen Seiten versehen ist, dass die Aequipotentiallinien auch im Magnetfelde gerade Linien bleiben; diese sind aber gegen die ursprüngliche Richtung (vor Wirkung des Magnetismus) überall um den Winkel γ gedreht, so dass für eine Substanz mit positivem R eine Aequipotentiallinie aus der ursprünglichen Lage ab in die Lage $a'b'$ gelangt (Fig. 810); verbindet man daher die Punkte a und b durch eine äussere Galvanometerleitung G, so erhält man in dieser den Hall'schen Strom, welcher dieselbe in der Richtung $aGba$ durchfliessen muss. Die entgegengesetzte Richtung hätte natürlich der Strom für eine Plattensubstanz mit negativem R (Fig. 804, S. 918). Wird eine kreisförmige Platte längs eines Radius aufgeschnitten (Fig. 807), so fallen die Stromlinien auch im Magnetfelde wieder mit den Plattenradien zusammen und der Widerstand der Platte erscheint dann durch Hall'sche Wirkung nicht verändert.

Fig. 810.



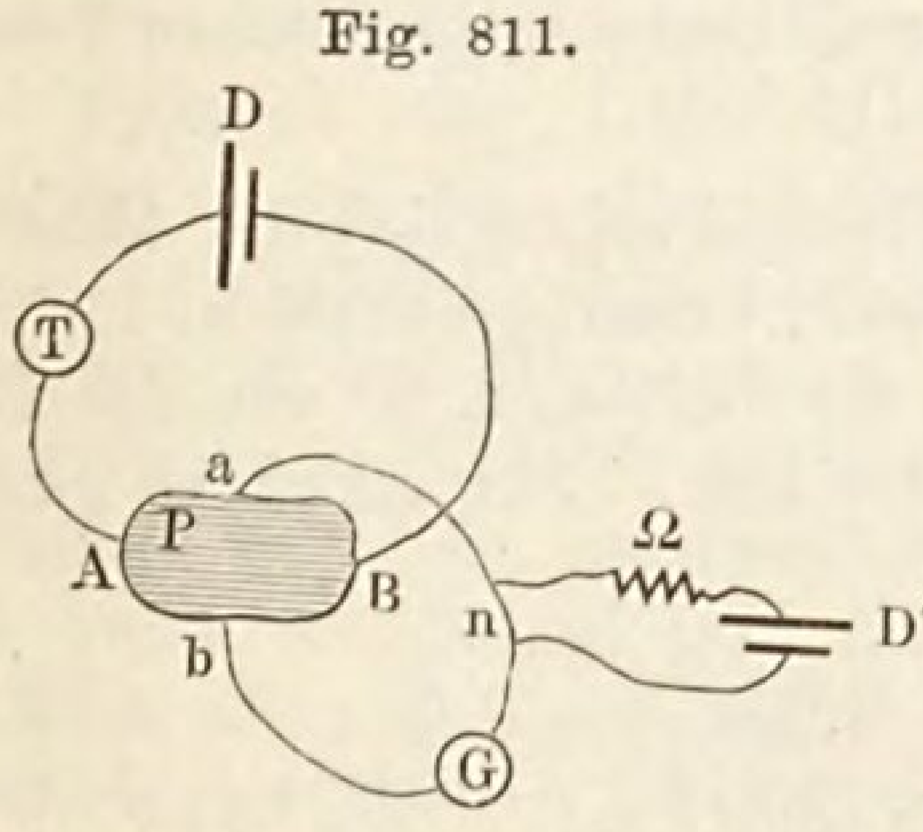
Das oben erwähnte theoretische Resultat der Widerstandsvergrösserung einer unaufgeschnittenen Kreisplatte im Verhältniss $1:1 + h^2$ ist

*) Für Wismuth kann h bis zum Werth $^1/_7$ steigen.

von v. Ettingshausen durch Versuche mit Wismuthplatten quantitativ bestätigt worden, ebenso wie eine andere eigenthümliche Folgerung der Theorie: wird nämlich eine rechteckige Platte mit ausgedehnten Primär-Elektroden A und B an den beiden Langseiten mit zahlreichen Hall-Elektroden versehen, so erscheint beim Verbinden der vis-à-vis liegenden Paare der Widerstand der Platte durch Hall'sche Wirkung etwas vergrössert.

Am leichtesten ist das Hall'sche Phänomen bei folgender Anordnung zu beobachten. Eine Wismuthplatte, etwa 1 mm dick, von beliebiger Gestalt, wird mit vier punktförmigen Elektroden versehen; man biegt hierzu die Kupferdrähte an den Enden zu kleinen Oesen, welche man mit einem leichtflüssigen Loth (Legirung von Wood oder Lipowitz) an den Rändern der Platte festlöthet. Die vier Elektroden werden dann alternierend für den Primär- und den Hall'schen Strom verwendet; man verbindet also etwa A und B (Fig. 811) mit den Polen eines Daniell'schen Elementes D, a und b dagegen mit einem Spiegelgalvanometer G. Um die Nadel des letzteren in die Nähe ihrer Ruhelage (ohne Strom) zu bringen — da a und b im Allgemeinen nicht äquipotentiale Stellen sein werden —, schaltet man in die derivirte Leitung einen kleinen

Fig. 811.



Widerstand n ein (ein Stück Draht von etwa $^1/_{20}$ bis $^1/_{10}$ S. E. Widerstand), und legt an die Enden desselben die Poldrähte eines Hülfselementes D', neben dem sich noch ein grosser, zu verändernder Widerstand Ω (Rheostat) befindet. Bei richtiger Schaltung von D' und passender Wahl von Ω ist es nunmehr sehr leicht, das Galvanometer G stromlos zu machen, um dann bei Erregung des Elektromagnets, zwischen dessen Polflächen die Platte steht, den Hall'schen Strom zu beobachten. Commutirt man die Richtung des die Elektromagnetrollen durchfliessenden Stromes, so erhält man die Nadeleinstellungen zu beiden Seiten der Ruhelage; ihre Differenz misst die doppelte Intensität des Hall'schen Stromes. Beobachtet man die Stärke des Primärstromes J an einer eingeschalteten Tangentenbussole T, so ist, wenn das Verhältniss der Reductionsfactoren von T und G bekannt ist, auch dass Verhältniss i/J gegeben. Indem man noch den Widerstand w der derivirten Leitung $aGba$ und ebenso das magnetische Feld M nach absolutem Maasse bestimmt*), hat man alle Daten, um das Drehungsvermögen $R = \frac{i}{J}\frac{w}{M}\delta$ zu berechnen.

*) Die Stärke eines magnetischen Feldes M bestimmt man am einfachsten dadurch, dass man eine kleine Drahtspule (oder auch eine einzige Windung)

Hall hatte bei Nickel beobachtet, dass R bedeutend abnimmt, wenn die Intensität des magnetischen Feldes stark wächst. Nach den ausgedehnten Beobachtungen von v. Ettingshausen und Nernst, die sich auf 19 Metalle, sowie auf Tellur und Kohle erstreckten, findet eine Abnahme des R mit wachsender Feldstärke bei vielen der untersuchten Substanzen statt. Am auffallendsten ist sie für Wismuth; so fanden sich für eine Platte aus chemisch reinem Metall die folgenden zusammengehörenden Werthe von M und R:

M (C.G.S.)	1 870	4 300	6 900	10 150	12 500	14 500
R	10,6	8,46	6,81	5,09	4,34	3,68
MR	19 820	36 380	46 990	51 660	54 250	53 360

Bemerkenswerth ist die Abnahme, welche das Product MR für sehr hohe Feldstärken zeigt; nach v. Ettingshausen liegt die Ursache hierfür wahrscheinlich in dem Auftreten der „galvanomagnetischen Temperaturdifferenz“ (s. §. 256).

Weit geringer als bei Wismuth und Nickel zeigte sich die Abnahme des R mit steigenden Werthen M bei Kobalt, ferner bei Stahl und Eisen; dagegen scheinen Tellur und Kohle ein constantes, d. h. von der Feldstärke unabhängiges Drehvermögen zu besitzen. Für schwache magnetisirende Kräfte ist für

	Te	Bi	Sb	Kohle	Ni	Fe
$R =$	+ 530	— 10,1	+ 0,192	— 0,176	— 0,024	+ 0,017

Co	Na	Au	Pt
+ 0,0046	— 0,0025	— 0,0007	— 0,0002

Mit steigender Temperatur wächst nach Hall das Drehungsvermögen bei Kobalt, Nickel, Eisen und Stahl, bei den nicht magnetischen Metallen tritt eine kleine Abnahme ein; nach v. Ettingshausen nahm bei einer Wismuthplatte R nahe auf die Hälfte ab, als die Temperatur von 0 auf 100^0 (bei constantem M) erhöht wurde. Bei Stahl fand Hall auch eine geringe permanente Wirkung, wonach also hier die Aequipotentiallinien gedreht bleiben, auch nachdem die äussere magnetische Wirkung aufgehört hat.

von bekannter Windungsfläche f, die mit einem langsam schwingenden Galvanometer verbunden ist, rasch aus dem magnetischen Felde herausbewegt; der dadurch entstehende Inductionsstrom, dessen Strommenge (Nadelausschlag α) dem Product fM entspricht, wird verglichen mit dem Inductionsstrom, den ein Erdinductor in derselben Leitung hervorruft, wenn man ihn um die verticale Axe um 180^0 dreht, so dass die Horizontalcomponente H des Erdmagnetismus dabei inducirend wirkt. Die Strommenge (Nadelausschlag β) in letzterem Falle entspricht $2FH$, so dass $M = \frac{2F}{f} \cdot H \cdot \frac{\alpha}{\beta}$ folgt; H ist durch Messung mit dem Magnetometer nach absolutem Maasse (C. G. S.) bekannt (s. §. 266).

Auffallend ist das Verhalten von Legirungen aus Wismuth und Zinn *); je nach dem Zinngehalt und der Feldstärke kann nämlich das Drehungsvermögen sein Vorzeichen wechseln. So zeigte z. B. eine Legirung, welche $1/2$ Proc. Zinn enthielt, für schwache Feldstärken negative, von $M = 9000$ an aber positive Drehungsvermögen; bei höherem Zinngehalt trat der Wechsel des Vorzeichens schon bei geringerer Feldstärke auf, und eine Legirung mit 13 Proc. Zinn zeigte überhaupt nur positive Werthe von R. Die absolute Grösse desselben ist dabei sehr vermindert, so dass bei der Legirung mit $1/2$ Proc. Zinn für $M = 1900$, $R = - 1{,}8$ ist, während für reines Wismuth R nahe $= - 10$ gefunden worden war. Dieses eigenthümliche Verhalten dürfte seine Erklärung finden in dem Auftreten der weiter unten zu besprechenden Phänomene, welche Wismuth und die Legirungen im magnetischen Felde zeigen.

Es ist auch gelungen, eine Hall'sche Wirkung zu erhalten, wenn man die Entladung eines Condensators in Funkenform durch Platten von Wismuth oder Tellur hindurchgehen liess, die magnetischer Einwirkung ausgesetzt waren (v. Ettingshausen und Nernst). Dagegen ist eine der Hall'schen ähnliche Wirkung in einem Dielektricum, also ein Einfluss des Magnetismus auf die dielektrische Polarisation nach Versuchen von Hall **) mit Glas und von van Aubel ***) mit Schwefel, Paraffin etc. nicht nachweisbar; auch sind bisher die Versuche, das Phänomen in Flüssigkeiten (Zinkvitriol, Quecksilber, Eisenchlorür) zu erhalten, ohne Erfolg geblieben (Roiti †).

Rowland ††) hat sich bemüht, die elektromagnetische Drehung der Polarisationsebene des Lichtes und die Hall'sche Erscheinung auf dieselbe Ursache zurückzuführen, doch sind manche Punkte seiner Theorie durch die Erfahrung nicht bestätigt worden.

Nach den bisher angestellten Untersuchungen hat es vielmehr den Anschein, dass das Hall'sche Phänomen durch Veränderungen bedingt sei, welche der Magnetismus in den vom galvanischen Strom durchflossenen, festen Leitern hervorbringt †††); dadurch wird der elektrische Leitungswiderstand in einer eigenthümlichen Weise verändert, wobei zwar die durchströmte Platte in allen Punkten gleich beschaffen bleibt und sich auch nach allen Richtungen gleich verhält, aber in den kleinsten Theilen eine besondere gedrehte Structur annimmt — wie Schraubenlinien, deren Axen die magnetischen Kraftlinien sind; diese Schraubenlinien ändern den Sinn ihrer Krümmung, wenn die Richtung des magnetischen Feldes (die magnetische Kraftrichtung) commutirt wird.

*) v. Ettingshausen und Nernst, Wiener Sitzungsber. 96, S. 787, 1887.
**) Phil. Mag. (5), X, S. 301, 1880.
***) Bulletins de l'Acad. royale de Belgique (3) X, 1885, XII, 1886.
†) Reale Accad. dei Lincei 1882.
††) Phil. Mag. (5) IX u. XI, 1880, 1881.
†††) Hopkinson, Phil. Mag. (5) X, S. 430, 1880.

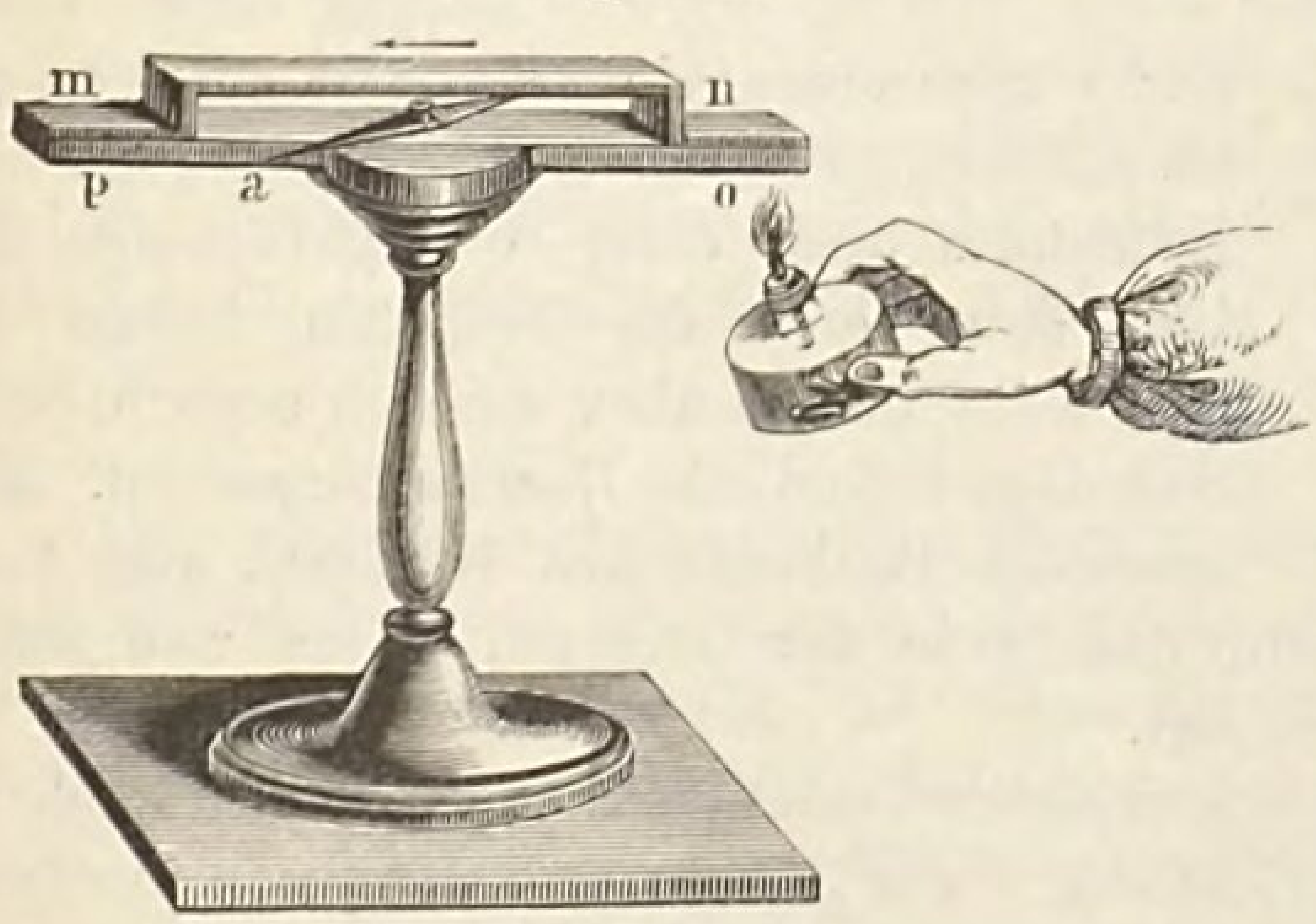
Boltzmann hat in seiner Theorie die Frage über die Ursache der transversalen elektromotorischen Kraft der Hall'schen Wirkung offen gelassen; nach den von ihm angewendeten Gleichungen kann die Wirkung des magnetischen Feldes in doppelter Weise aufgefasst werden: entweder, indem man annimmt, dass das Magnetfeld eine elektromotorische Kraft wecke in einer Richtung senkrecht zu jener des primären Stromes und zu jener der magnetischen Kraft, oder auch, dass der elektrische Leitungswiderstand der Platten in der eben erwähnten Weise modificirt werde.

Siebentes Capitel.

Thermo-Elektricität.

Seebeck's Fundamentalversuche. Wir haben oben im §. 103 erörtert, dass in einer in sich geschlossenen Kette von metallischen Leitern gleicher Temperatur kein Strom entstehen kann, weil sich die entgegengesetzten elektromotorischen Kräfte in ihrer stromerregenden Wirkung aufheben. Dies gilt bei ungleicher Temperatur der Metalle oder der Berührungspunkte nicht mehr. Im Jahre 1823 machte nämlich Seebeck*) die Entdeckung, dass in einem ganz metallischen Bogen, welcher aus einem auf einen Wismuthstab aufgelötheten Kupferbügel bestand, ein Strom entstand, sobald die eine der beiden Löthstellen eine höhere Temperatur hatte als die andere. Fig. 812 stellt einen Apparat dar, dessen man sich zur Wiederholung des Seebeck'schen Grundversuchs bedienen kann. *po* ist ein Stäbchen von Wismuth, *mn* ein Bügel von Kupfer, welcher mit seinen Enden auf das Wismuthstäbchen aufgelöthet ist; *a* ist eine auf einer Spitze frei spielende Magnetnadel. Wenn die beiden Löthstellen noch die Temperatur der umgebenden Luft haben, wird der Apparat so gestellt, dass die Längsaxe von *po* in die Ebene des magne- 244

Fig. 812.



*) Glibert's Ann. LXXIII.

tischen Meridians fällt, dass also die Nadel mit der Axe und den Längenkanten des Wismuthstäbchens parallel steht; sobald nun eine der Löthstellen, etwa *o*, erwärmt wird, erleidet die Nadel eine mehr oder weniger bedeutende Ablenkung; erkaltet man aber dieselbe Löthstelle *o* unter die Temperatur der anderen Löthstelle *p*, so beobachtet man eine Ablenkung nach entgegengesetzter Richtung.

Diese Ablenkungen der Nadel bald nach der einen bald nach der andern Seite zeigen offenbar einen elektrischen Strom an, welcher den Apparat in einer bestimmten Richtung durchkreist, wenn die Löthstelle *o* wärmer ist als *p*, in der entgegengesetzten aber, wenn die Löthstelle *o* kälter ist als die Löthstelle *p*.

Im Allgemeinen wird in jedem aus zwei verschiedenen Metallen gebildeten Ringe ein Strom entstehen, wenn die eine Löth- (oder Berührungs-)stelle wärmer ist als die andere. Seebeck nannte die so entstandenen Ströme thermo-elektrische. Einen aus zwei Metallen, die an zwei Stellen zusammengelöthet oder auf andere Weise in metallische Berührung gebracht sind, gebildeten Bogen aber nannte er ein thermo-elektrisches Element (abgekürzt: Thermoelement).

Sehr kräftige thermo-elektrische Elemente werden aus Wismuth und Antimon gebildet, die man zu einem länglichen Rechteck zusammensetzt, wie Fig. 813 zeigt, in welcher die hell schraffirte Hälfte Wismuth, die andere Antimon bezeichnet. Die beiden Metalle sind bei *s* und *r* zusammengelöthet. Um den Versuch zu machen, erwärmt man vorsichtig die eine Löthstelle über einer Weingeistlampe und hält dann eine der längeren Seiten des Rechtecks gerade über die sich noch in ihrer Ruhelage befindliche Declinationsnadel. Man muss das Rechteck aus Wismuth und Antimon doch so gross machen, dass jede der längeren Seiten wenigstens die Länge der Magnetnadel hat.

Fig. 813.

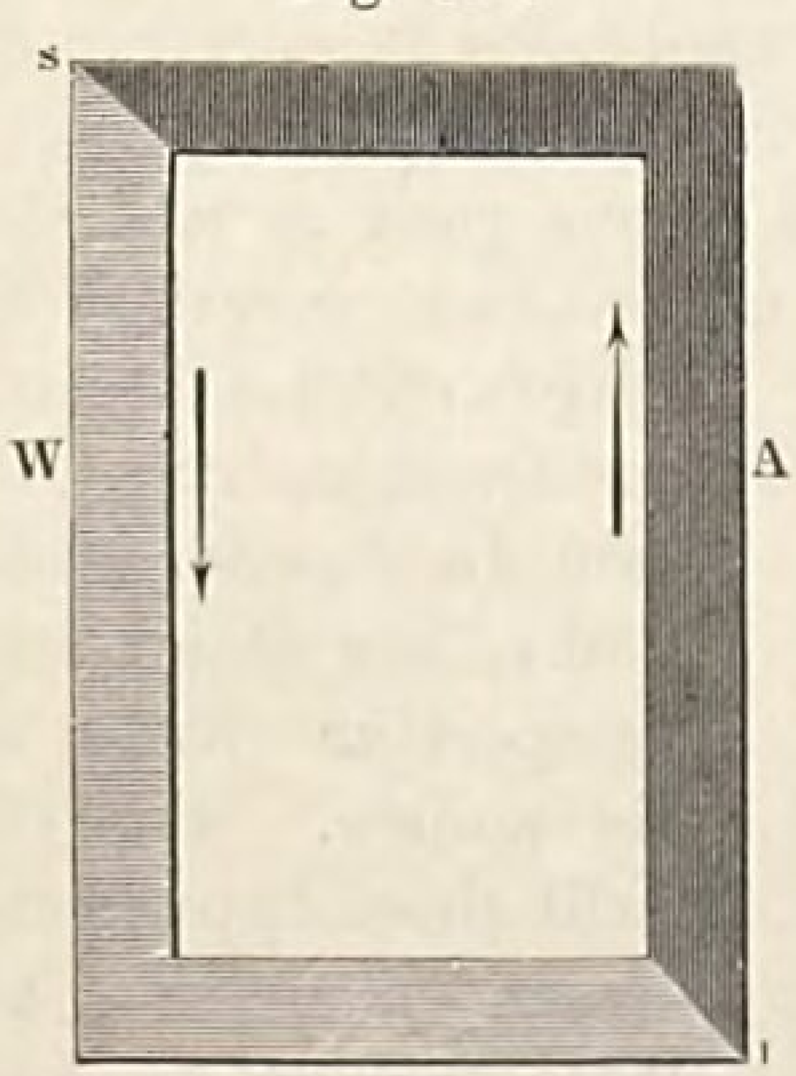
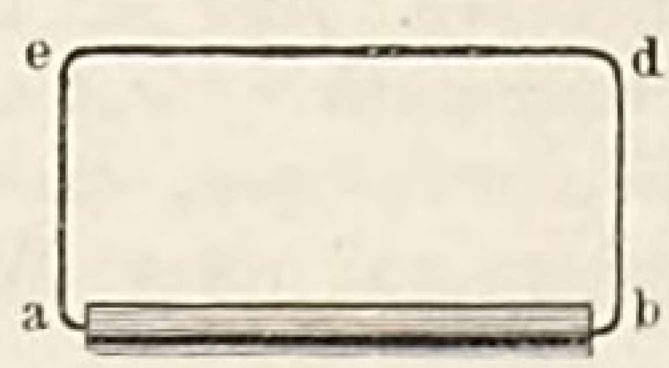


Fig. 814.

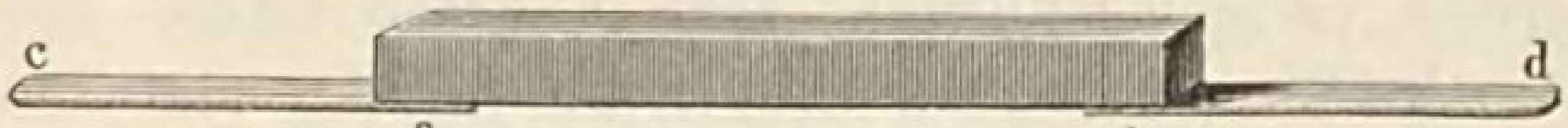


Häufig haben die einfachen thermo-elektrischen Elemente auch die Fig. 814 dargestellte Einrichtung. *ab* ist ein Stäbchen von Antimon oder Wismuth, an dessen beide Enden ein Kupferdraht *aedb* angelöthet ist. Um den Versuch zu machen, wird die eine Löthstelle erwärmt und das Drahtstück *ed* über die Nadel gehalten.

Die bisher betrachteten thermo-elektrischen Elemente bilden an und für sich schon einen geschlossenen Leitungsbogen; man kann sie aber auch offen machen und die Schliessung der Kette durch einen Multiplicator bewerkstelligen.

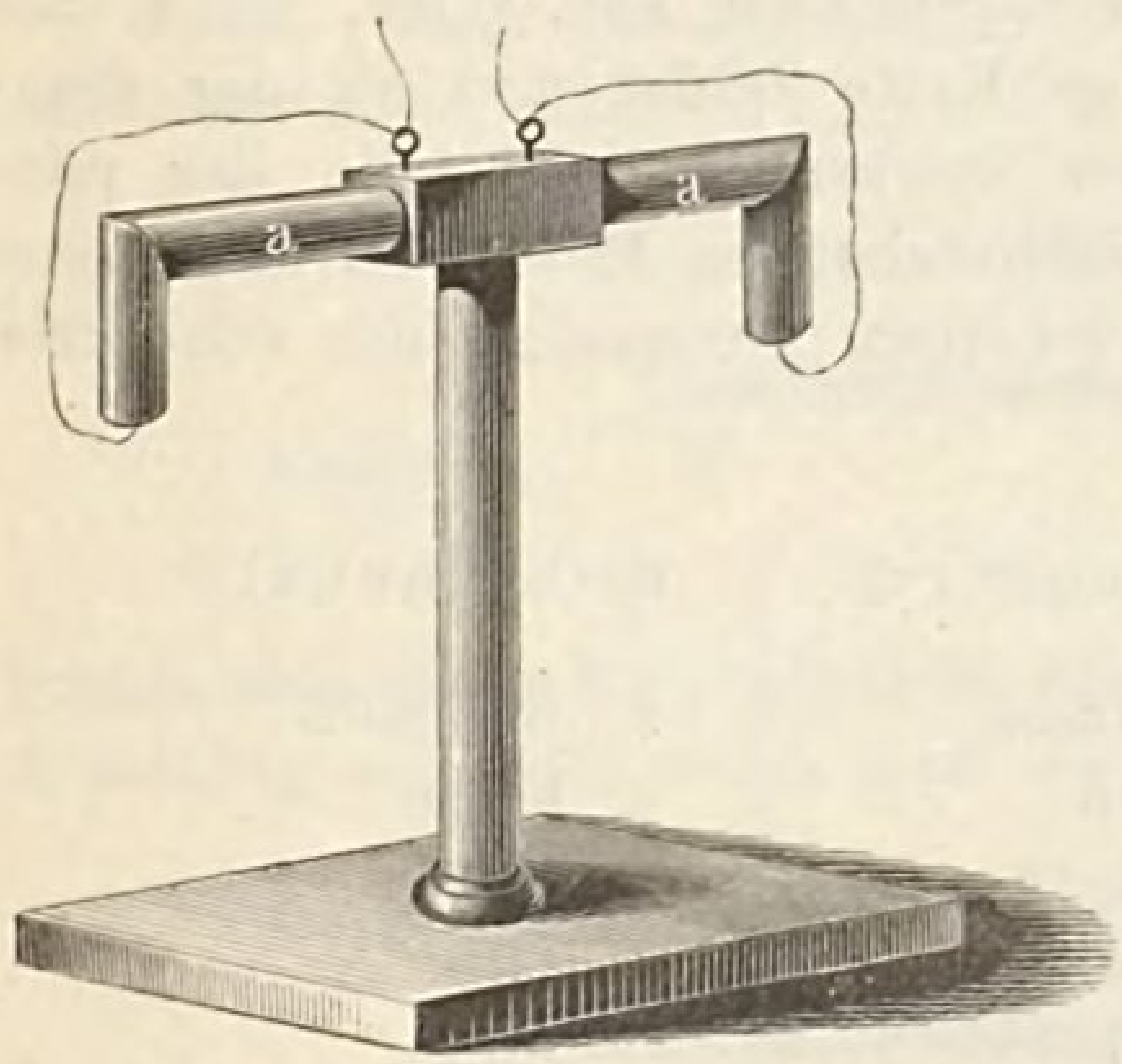
Fig. 815 stellt ein offenes thermo-elektrisches Element dar. An die beiden Enden eines Wismuthstabes sind Streifen von Kupferblech angelöthet. Bringt man die Enden *c* und *d* mit den Drahtenden eines

Fig. 815.



Multiplicators in leitende Verbindung, so wird die Nadel desselben abgelenkt, wenn man eine der Löthstellen *a* oder *b* erwärmt.

Fig. 816.



Eine sehr zweckmässige Form hat Pouillet den offenen Thermo-Elementen gegeben, welche in Fig. 816 dargestellt ist.

Ein auf beiden Seiten mit einem kurzen verticalen Arm endigender Wismuthstab *a* wird von einem passenden Stativ getragen. An jedem Ende dieser vertical herabreichenden Wismutharme ist unten ein Kupferdraht angelöthet, und mittelst dieser beiden Kupferdrähte kann man einen Multiplicator in den Schliessungskreis des Thermo-Elementes einschalten. Wird nun die eine Löthstelle in ein Gefäss mit schmelzendem Schnee, die andere aber in ein Gefäss eingetaucht, in welchem Wasser durch eine untergesetzte Lampe im Kochen erhalten wird, so liefert ein solches Element Ströme von sehr constanter elektromotorischer Kraft.

Das zur Beobachtung der Thermoströme benutzte Galvanometer darf nur geringen Widerstand, also wenige Windungen dicken Drahtes besitzen, da die elektromotorische Kraft der Thermoelemente relativ sehr klein ist.

Die thermo-elektrische Spannungsreihe. Um mit Hülfe eines Multiplicators die thermo-elektrischen Ströme zu untersuchen, welche irgend zwei Metalle mit einander geben, wie z. B. Eisen und Platin, reicht es hin, ein Stück Platindraht entzweizuschneiden und jedes Stück an dem einen Ende des Multiplicatordrahtes zu befestigen, so dass ein vollkommen metallischer Contact zwischen Platin und Kupfer besteht. Ist diese Einrichtung getroffen, so ist es gerade so gut, als ob der ganze Multiplicatordraht von Platin wäre, vorausgesetzt, dass die beiden Berührungsstellen zwischen dem Kupfer- und Platindraht ganz gleiche Temperatur haben; man braucht dann nur zwischen den beiden freien Platinenden ein Stück Eisendraht anzubringen und die eine Berührungsstelle zwischen Platin und Eisen zu erwärmen, während die andere kalt 245

bleibt, so erhält man den thermo-elektrischen Strom, welcher von der Temperaturdifferenz der beiden Stellen herrührt, in welchen sich Platin und Eisen berühren.

Wenn man verschiedene Metalle diesem Versuche unterwirft, so findet man grosse Verschiedenheiten; denn während irgend zwei Metalle einen relativ kräftigen Strom geben, geben zwei andere unter ganz gleichen Verhältnissen nur einen ausserordentlich schwachen Strom.

Die Untersuchungen, die man über das gegenseitige Verhalten verschiedener Metalle in Beziehung auf die Erregung thermo-elektrischer Ströme gemacht hat, haben gezeigt, dass sich die Metalle in eine Reihe zusammenstellen lassen, welche die Eigenschaft hat, dass, wenn man aus zwei Metallen dieser Reihe eine Kette bildet und an der einen Berührungsstelle erwärmt, an dieser erwärmten Löthstelle der positive Strom von dem in der Reihe tieferstehenden Metall zu dem höher stehenden übergeht. Diese Reihe ist (mit Auslassung der selteneren Metalle):

nach Seebeck	nach Becquerel	nach Hankel
+ Antimon	+ Antimon	+ Antimon
Eisen	Eisen	Eisen
Zink	Zink	Silber
Silber	Silber	Zink
Gold	Gold	Blei
Zinn	Kupfer	Zinn
Blei	Blei	Kupfer
Quecksilber	Platin	Gold
Kupfer	— Wismuth	Platin
Platin		Quecksilber
— Wismuth		— Wismuth

In dem Apparat Fig. 812 geht also, wenn die Löthstelle bei *o* erwärmt ist, der positive Strom in der Richtung von *o* durch den Kupferbügel nach *m* und dann durch den Wismuthstab nach *o* zurück; an der erwärmten Berührungsstelle *o* ist also das in der Reihe höher stehende Kupfer positiv gegen das tiefer stehende Wismuth. In dem Rechteck Fig. 813 circulirt der positive Strom in der Richtung der Pfeile, wenn die Löthstelle bei *r* wärmer ist.

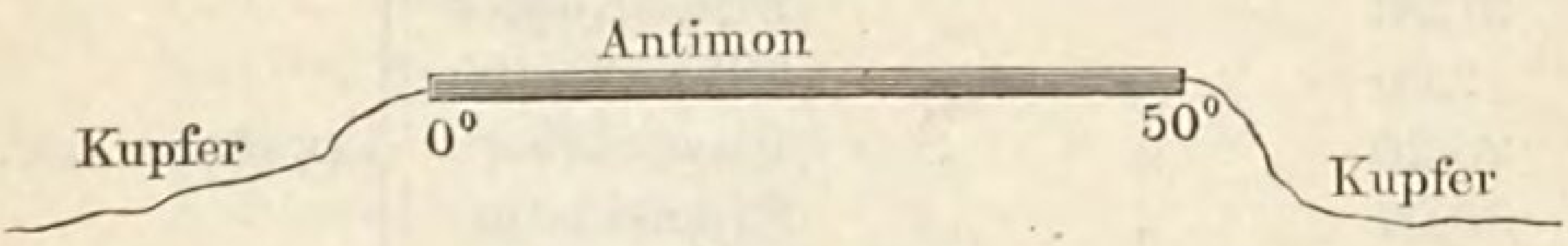
Die drei oben mitgetheilten thermo-elektrischen Spannungsreihen zeigen mehrfache Abweichungen von einander. So steht z. B. das Kupfer in der Becquerel'schen Reihe höher, in den beiden anderen tiefer als Blei. Solche Abweichungen sind aber leicht begreiflich, wenn man bedenkt, dass die Stellung eines Metalls in der Reihe schon durch geringe Beimengungen anderer Stoffe bedeutend alterirt wird. So fand z. B. Seebeck eine Sorte käuflichen Kupfers zwischen Gold und Zinn

stehend, während er für reines, aus Oxyd reducirtes Kupfer die oben angegebene Stellung gefunden hatte. Ausserdem ist, wie wir hören werden, die Temperatur von wesentlichem Einfluss.

Die thermo-elektrische Differenz zweier Metalle ist um so bedeutender, je weiter dieselben in der thermo-elektrischen Spannungsreihe aus einander stehen. Bei gleicher Temperaturdifferenz der Löthstellen wird also ein thermo-elektrisches Element aus Antimon und Wismuth einen stärkeren Strom geben, als ein solches aus Antimon und Zinn, und dieses giebt wieder einen stärkeren Strom als ein aus Zink und Zinn gebildetes Thermo-Element.

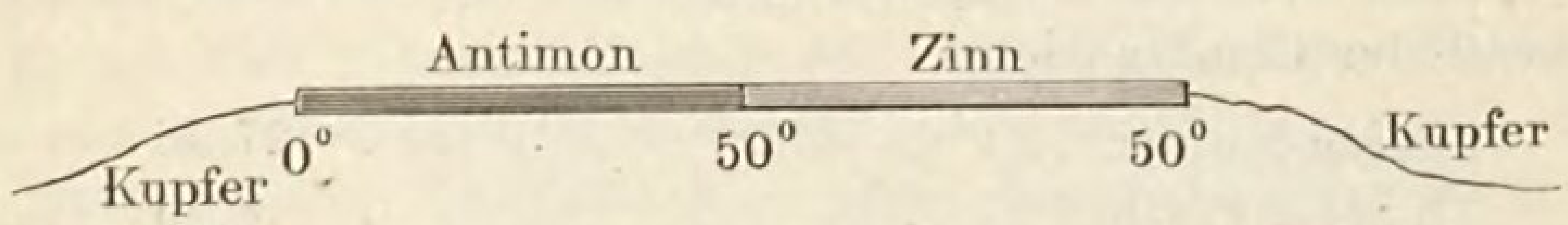
Löthet man an die beiden Enden eines Metallstabes, z. B. eines Antimonstabes, Fig. 817, zwei Kupferdrähte, welche zu den beiden

Fig. 817.



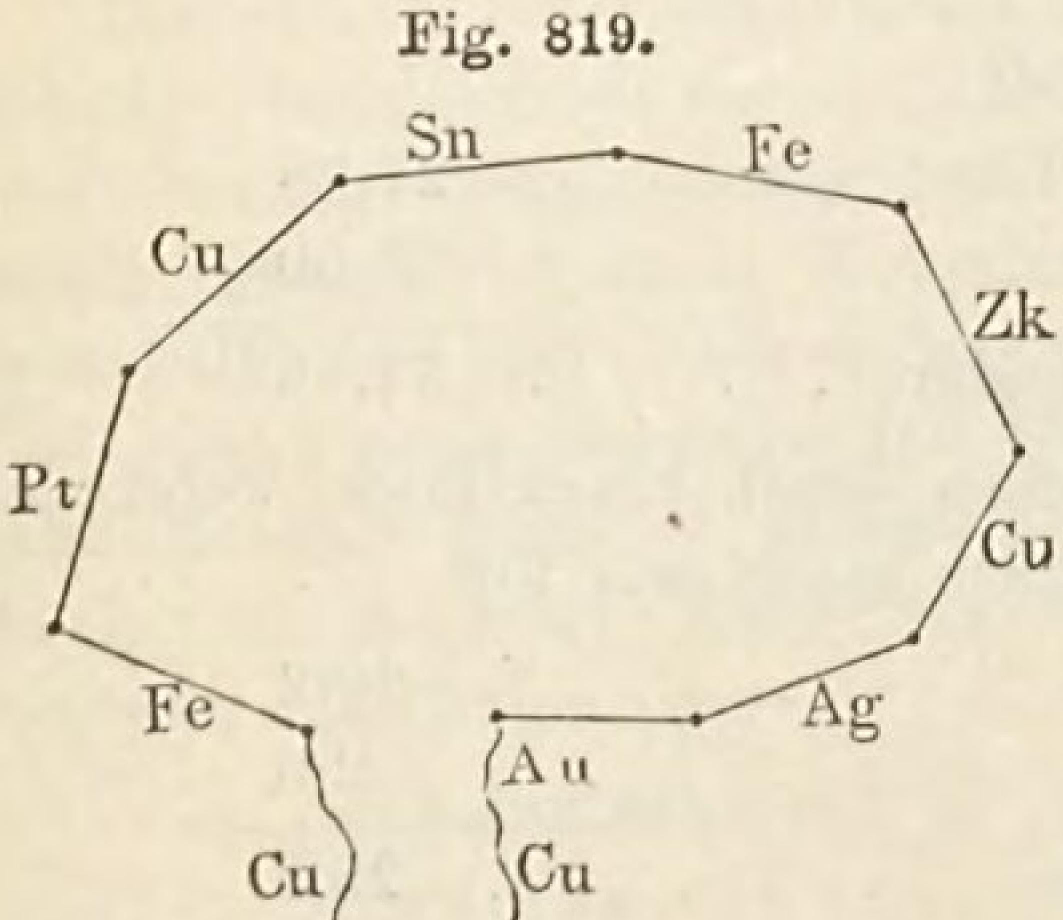
Drahtenden eines Multiplicators führen, so wird man einen bestimmten Ausschlag erhalten, wenn man die eine Löthstelle auf 0° erkaltet, die

Fig. 818.



andere auf etwa 50° erwärmt. Denselben Ausschlag erhält man aber auch, wenn man an den Antimonstab zunächst einen Zinnstab, Fig. 818, und an diesen erst den zweiten Kupferdraht anlöthet und nun die Löthstelle Kupfer-Antimon wieder auf 0° erkaltet, die beiden anderen Löthstellen (Antimon-Zinn, Zinn-Kupfer) aber beide auf 50° erwärmt, vorausgesetzt, dass der Leitungswiderstand der ganzen Kette durch die Einschaltung des Zinnstabes nicht merklich verändert worden ist.

Fig. 819.



Daraus folgt denn, dass, wenn man zwischen die beiden Drahtenden eines Galvanometers eine ganze Reihe von an einander gelötheten Metalldrähten einschaltet, wie es Fig. 819 andeutet, und alle Löthstellen bis auf eine, die auf t^0 erwärmt ist, auf 0° erkaltet, dass man alsdann denselben Ausschlag erhalten wird, als ob der ganze Schliessungsbogen bei unverändertem Widerstande nur aus den beiden Metallen ge-

bildet wäre, die sich an der auf t^0 erwärmten Löthstelle berühren. Ist z. B. die Löthstelle zwischen Zinn und Eisen auf t^0 erwärmt, während alle anderen Löthstellen auf 0^0 erkaltet sind, so erreicht der thermoelektrische Strom dieselbe Stärke, als ob (bei unverändertem Leitungswiderstande) der ganze Schliessungsbogen nur aus Eisen und Zinn zusammengesetzt, und die eine Löthstelle auf t^0 erwärmt, die andere auf 0^0 erkaltet wäre.

Becquerel führte den Versuch in der Fig. 819 angedeuteten Weise aus. Während alle übrigen Löthstellen auf 0^0 erkaltet waren und nur eine auf 20^0 erwärmt wurde, war die am Galvanometer abgelesene Stromstärke

31,24,	wenn	die	Löthstelle	Eisen-Zinn	erwärmt war.
8,55	"	"	"	Kupfer-Platin	
27,96	"	"	"	Eisen-Kupfer	
2,00	"	"	"	Silber-Kupfer	
26,20	"	"	"	Eisen-Silber	
36,07	"	"	"	Eisen-Platin	
3,50	"	"	"	Kupfer-Zinn	
1,00	"	"	"	Zink-Kupfer	
0,50	"	"	"	Silber-Gold	

Es ist also für eine Temperaturdifferenz von 20^0 die elektromotorische Kraft der Combination

Eisen-Kupfer	27,96
Kupfer-Platin	8,55
die Summe beider	36,51

also sehr nahe gleich der für die Combination Eisen-Platin gefundenen elektromotorischen Kraft 36,07.

Es ist die elektromotorische Kraft

Eisen-Kupfer	27,96
Kupfer-Zinn	3,50
die Summe beider	31,46

sehr nahe gleich der elektromotorischen Kraft Eisen-Zinn, welche nach obiger Tabelle gleich 31,24 ist. Ferner haben wir für

Eisen-Silber	26,2
Silber-Kupfer	2,0
deren Summe	28,2

sehr nahe gleich der elektromotorischen Kraft 27,96 der Combination Eisen-Kupfer etc.

Aus diesen Versuchen geht also hervor, dass die Summe der elektromotorischen Kräfte zweier Thermo-Elemente, von denen das eine gebildet ist aus einem Metalle *b* und einem in der Thermoreihe über ihm stehenden Metalle *a*, das an-

dere aber aus dem Metalle *b* und einem in der Thermoreihe unter ihm stehenden Metalle *c* gleich ist der elektromotorischen Kraft eines aus *a* und *c* gebildeten Thermo-Elementes.

Auch Matthiessen*) hat die elektromotorischen Kräfte einer grossen Reihe von Thermo-Elementen und zwar für geringere Temperaturdifferenzen bestimmt. Die thermo-elektromotorische Kraft zwischen chemisch reinem Silber und käuflichem weichem Kupferdraht gleich 1 gesetzt, ist die elektromotorische Kraft des Thermo-Elementes

Silber-Wismuth, rein, gepresster Draht	+ 32,9
„ „ „ gegossen	+ 24,9
„ Argentan, hart	+ 5,2
„ Quecksilber	+ 2,5
„ Blei	+ 1,0
„ Platin, käuflicher Draht	+ 0,723
„ Kupfer, galvanoplastisch	+ 0,244
„ Antimon, käuflicher Draht	— 1,89
„ Antimon, rein, gegossen	— 9,87
„ Legirung, 12 Wismuth 1 Zinn	— 13,67
„ „ 2 Antimon 1 Zink	— 22,7
„ Tellur	— 179
„ Selen	— 290

Es ist dies nur ein Auszug aus der vollständigen Tabelle Matthiessen's. Das Zeichen + besagt, dass sich Silber gegen das fragliche Metall positiv, das Zeichen — aber, dass sich Silber negativ gegen dasselbe verhält.

Sehr auffallend ist die extreme Stellung, welche Tellur und Selen einnehmen.

Die elektromotorische Kraft thermo-elektrischer Elemente ist sehr klein im Vergleich zu derjenigen der hydro-elektrischen Elemente. Die erste derartige Vergleichung hat Pouillet angestellt; er fand die elektromotorische Kraft eines Wismuth-Kupfer-Elementes für eine Temperaturdifferenz der Löthstellen von 50° gleich 0,053 von der eines Wollaston'schen Bechers. Die elektromotorische Kraft eines Daniell'schen Bechers gleich 1 gesetzt, ist die elektromotorische Kraft eines Wismuth-Kupfer-Elementes für eine Temperaturdifferenz von 100° nach den Messungen von

Wheatstone	0,0084
Neumann	0,0039.

Zur Vergleichung thermo-elektrischer Elemente mit hydro-elektrischen sind unter den in den §§. 140 und 141 besprochenen Methoden die Compensationsmethode und die Fechner'sche Methode grosser Widerstände die zweckmässigsten.

*) Pogg. Ann. CIII.

246 **Thermo-elektrisches Verhalten von Legirungen und Mineralien.** Schon Seebeck hat gefunden, dass manche Legirungen in der thermo-elektrischen Spannungsreihe nicht zwischen den Metallen stehen, aus welchen sie zusammengesetzt sind. So fand er z. B. eine Legirung aus

3	Wismuth	und	1	Zinn	zwischen	Antimon	und	Eisen
3	„	„	1	Blei	„	Eisen	„	Zink
1	„	„	1	Zinn	„	Zink	„	Silber

stehend.

Später sind noch wirksamere Legirungen aufgefunden und zur Construction von Thermosäulen benutzt worden, über welche unten Näheres mitgetheilt werden soll.

Mehrere Physiker haben die Beobachtung gemacht, dass verschiedene in der Natur vorkommende Schwefelmetalle mit Kupfer oder auch unter einander combinirt thermo-elektrische Elemente von grosser elektromotorischer Kraft liefern. So fand z. B. Bunsen, dass Kupferkies und Kupfer ein Thermo-Element liefern, dessen elektromotorische Kraft für eine Temperaturdifferenz von 100° gleich $^1/_{15}$, für eine Temperaturdifferenz von 150° aber $^1/_{10}$ von der elektromotorischen Kraft eines Daniell'schen Bechers ist.

Stefan*) fand, dass unter den sogleich näher anzugebenden Umständen die elektromotorische Kraft eines Thermo-Elementes aus

Blätterigem Kupferkies und Kupfer	gleich ist $^1/_{26}$	von der elektromotorischen Kraft eines Daniell'schen Bechers
Compactem Kupferkies-Kupfer . .	„ „ $^1/_9$	
Comp. Kupferkies-Blättr. Kupferkies	„ „ $^1/_{14}$	
Kupfer-Krystallisirtem Kobaltkies .	„ „ $^1/_{26}$	
Körnigem Kobaltkies-Kupfer . . .	„ „ $^1/_{78}$	
Kupfer-Schwefelkies	„ „ $^1/_{16}$	
Compactem Kupferkies-Schwefelkies	„ „ $^1/_6$	
Bleiglanz in gross. Kryst.-Kupfer .	„ „ $^1/_{10}$	

etc.

In dieser Tabelle ist stets der elektropositive Körper vorangestellt.

Diese Resultate zeigen, welch bedeutenden Einfluss die Structur eines Körpers auf sein thermo-elektrisches Verhalten hat. Während sich z. B. krystallisirter Kobaltkies gegen Kupfer stark negativ verhält, ist amorpher Kobaltkies schwach positiv gegen Kupfer.

Natürlicher Kupferkies lässt sich in starker Rothglühhitze ohne merkliche Zersetzung schmelzen und in beliebige Formen giessen. Solch umgegossener Kupferkies zeigt aber, wie Bunsen fand, in thermo-elektrischer Beziehung ein ganz anderes Verhalten als der natürliche krystallisirte, er sinkt nämlich in der Thermoreihe noch unter Wismuth herab, so dass er negativ gegen Kupfer wird.

*) Poggendorff's Annal. CXXIV, S. 633, 1865.

Das Verfahren, dessen sich Stefan zur Ermittelung obiger Zahlenwerthe bediente, war folgendes: Das zu untersuchende Mineral wurde auf das Ende eines Kupferstreifens, auf das Mineral das Ende eines Drahtes gelegt, und das Ganze durch eine Zwinge zusammengedrückt. Dieser Draht und ein von dem freien Ende des Kupferstreifens ausgehender führen zu einem Galvanometer mit grossem Widerstande. Der Kupferstreifen wird durch eine Weingeistlampe erwärmt.

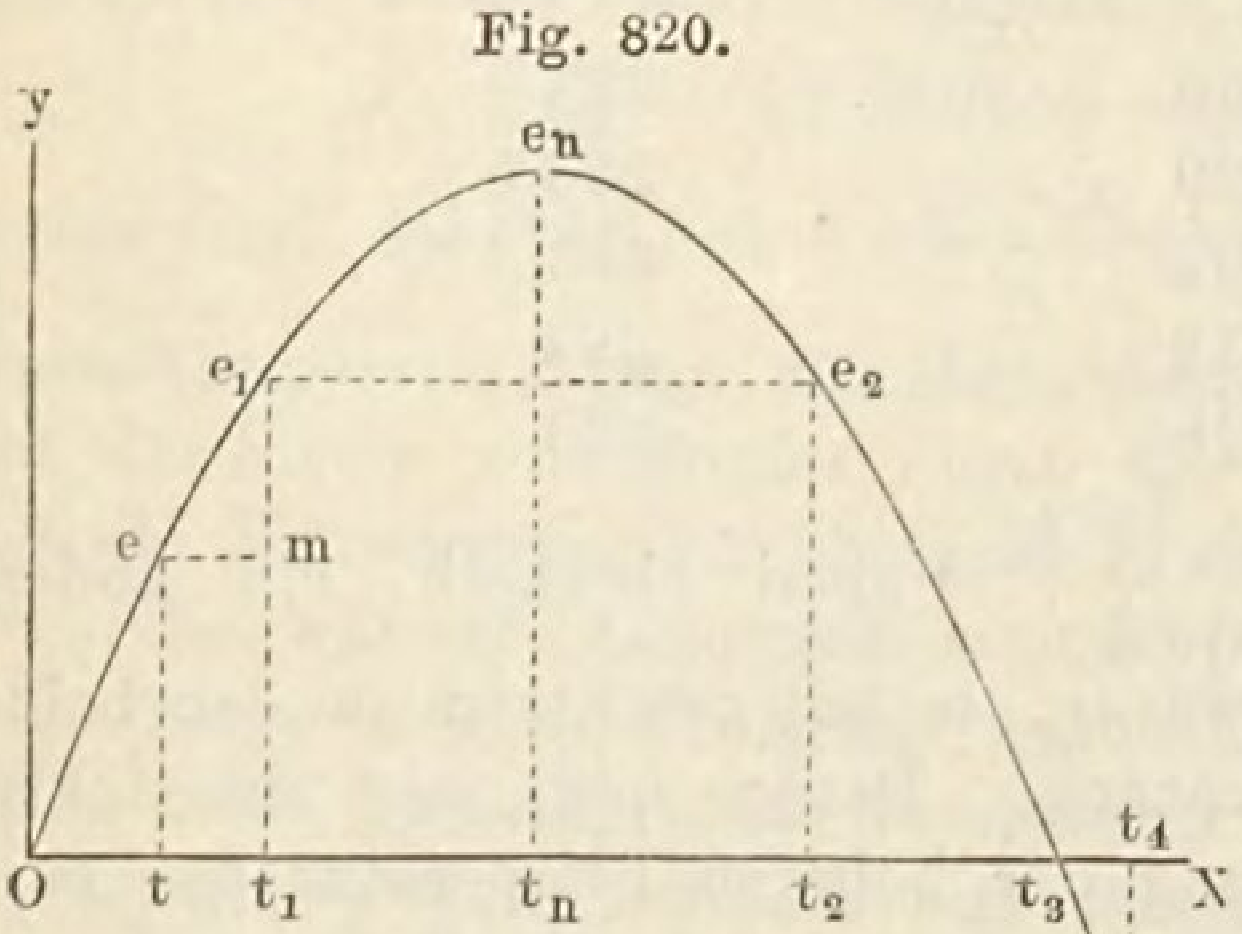
Um zwei beliebige Mineralien zu einem Thermo-Element zu verbinden, wurde ein Kupferstreifen zwischen beide gebracht, an ihre abgewendeten Seiten Drähte angelegt und das Ganze mit einer Holzzwinge zusammengedrückt. Der freie Fortsatz des Kupferstreifens wurde in die Flamme gebracht, diente also nur als Zuleiter der Wärme zur Berührungsstelle.

Eine grössere Menge von Mineralien wurde von Flight*) sowie von Schrauf und Dana**) und von Groth***) untersucht. Wir müssen diesbezüglich auf die Citate und auf G. Wiedemann's Lehre von der Elektricität Bd. II. verweisen.

Einfluss der Temperatur. Die elektromotorische Kraft eines 247
Thermoelementes ist nicht allein von der Temperaturdifferenz der Löthstellen, sondern auch von der absoluten Höhe der Temperaturen abhängig. Wir wollen diesen Sachverhalt nach Gaugain auf graphischem Wege zur Darstellung bringen.

Die eine Löthstelle eines Thermoelementes, z. B. von Eisen und Silber, werde constant auf Null Grad erhalten, die andere nach und nach auf höhere Temperaturen gebracht. In Fig. 820 sollen diese Temperaturen als Abstände ot, ot_1, ... auf der Abscissenaxe aufgetragen sein, während die gleichzeitigen elektromotorischen Kräfte durch die Ordinaten te, t_1e_1 der Curve oee_1 ... dargestellt seien. Die Temperatur der ersten Löthstelle fällt mit dem Anfangspunkt 0 zusammen. So lange die der zweiten Löthstelle sich nicht weit von diesem Punkt entfernt, sind die Ordinaten den Abscissen nahe proportional, die Curve steigt daher nahe geradlinig empor. Die Tangente ihres Neigungswinkels giebt das Ver-

Fig. 820.



*) Phil. Mag. (4) XXX, S. 337, 1865.
**) Wien. Acad. Ber. 2, LIX, S. 142, 1874.
***) Pogg. Ann. CLII, S. 249, 1874.

hältniss der Zunahmen der elektromotorischen Kraft zu den Zunahmen der Temperatur. Sobald man aber die letztere weiter steigen lässt, verlangsamt sich die Zunahme der elektromotorischen Kraft, sie erreicht einen Maximalwerth für eine bestimmte Temperatur t_n, sinkt sodann für noch höhere Temperaturen, wird für eine Temperatur $t_3 = 0$ und geht für noch höhere, z. B. t_4, in negative Werthe über, so dass sich der Strom des Thermoelements umkehrt. Diese Umkehrung wurde zuerst von Cumming im Jahre 1823 beobachtet.

Hätten wir die Temperatur der kälteren Löthstelle statt auf 0° auf einer anderen, z. B. höheren Temperatur t, constant erhalten, so brauchten wir in der Fig. 820 nur die Abscissenaxe parallel zu sich in die Lage $e_1\ e_2$ zu verschieben, um wiederum dieselbe Curve, wie vorhin, benützen zu können.

Nach den Untersuchungen von Avenarius und W. Thomson entspricht die Curve einer Parabel mit senkrecht stehender Axe (Gaugain hielt sie für eine Hyperbel). Die gleich hohen Ordinaten stehen daher symmetrisch zu beiden Seiten der Maximalordinate. Es giebt demnach für jede Combination zweier Metalle eine gewisse Temperatur, welche die Neutraltemperatur t_n genannt wird. So oft nun das arithmetische Mittel der Temperaturen der Löthstellen gleich dieser Neutraltemperatur ist, entsteht kein Strom. So z. B. ist für Silber und Eisen die Neutraltemperatur $t_n = 223{,}5$, die Beobachtung von Avenarius ergab, dass kein Strom entsteht, wenn die Temperaturen der Löthstellen t_1 und t_2 folgende Werthe hatten:

t_1	t_2	$t_n = \frac{t_1 + t_2}{2}$
186	260	223
158	289	223,5
145	302	223,5
136	312	224
118	328	223

Liegt die Mitteltemperatur $\frac{t_1 + t_2}{2}$ einmal oberhalb, ein anderes Mal unterhalb der Neutraltemperatur, so hat der Strom in den beiden Fällen eine entgegengesetzte Richtung. Daraus folgt, dass die elektromotorische Kraft durch Steigerung der höheren Temperatur der einen Löthstelle oder durch Verminderung der niedrigeren Temperatur der anderen Stelle nicht immer verstärkt werden muss, sondern dass sie auch ein Maximum erreichen und überschreiten kann.

Um diese Thatsachen zu erklären, nahm man an, dass bei der Berührung zweier Metalle eine elektromotorische Kraft entstehe, welche von der Temperatur der Berührungsstelle abhängig sei, in der Weise, dass diese elektromotorische Kraft im Allgemeinen gegeben sei durch eine Gleichung von der Form

$$e = \alpha + \beta t + \gamma t^2.$$

Wird nun aus diesem Metallpaar eine Kette gebildet, und hat dieselbe an den beiden Berührungspunkten dieselbe Temperatur, so entsteht natürlich kein Strom, weil sich gleiche elektromotorische Kräfte entgegenwirken. Sind die Temperaturen aber verschieden, nämlich t_1 und t_2, so entstehen zwei elektromotorische Kräfte e_1 und e_2, deren Differenz

$$E = e_2 - e_1 = \beta\,(t_2 - t_1) + \gamma\,(t_2^2 - t_1^2)$$
$$= (t_2 - t_1)\,[\beta + \gamma\,(t_2 + t_1)] \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 1)$$

die resultirende elektromotorische Kraft des Elementes abgiebt. Man ersieht aus der Form des Productes, dass $E = 0$ wird, nicht bloss, wenn

$$t_1 = t_2,$$

sondern auch dann, wenn

$$\beta = -\,\gamma\,(t_1 + t_2)$$

oder

$$\frac{-\beta}{2\gamma} = \frac{t_1 + t_2}{2}.$$

Der Ausdruck $\frac{-\beta}{2\gamma}$ giebt also diejenige Mitteltemperatur der Löthstellen, für welche der Strom jedesmal $= 0$ ist, das ist also die Neutraltemperatur. Innerhalb gewisser Grenzen, welche für verschiedene Combinationen verschieden weit sind, ist die elektromotorische Kraft für dieselbe Mitteltemperatur der Temperaturdifferenz der Löthstellen proportional. Insofern der Widerstand derselbe bleibt, ist also auch die Stromstärke dieser Temperaturdifferenz proportional. Für Kupfer und Eisen fand Avenarius unter Zugrundelegung einer willkürlichen Stromeinheit folgende Gleichung:

$$J = (t_2 - t_1)\,[0{,}9653 - 0{,}00175\,(t_2 + t_1)],$$

woraus folgt, dass für $J = 0$ $\frac{t_2 + t_1}{2} = 275{,}8^0$ ist. $275{,}8^0$ ist also die Neutraltemperatur; liegt die Mitteltemperatur unterhalb derselben, so geht der Strom vom Kupfer durch die wärmere Löthstelle zum Eisen, liegt die Mitteltemperatur oberhalb $275{,}8^0$, so geht der Strom vom Eisen durch die wärmere Löthstelle zum Kupfer. Kupfer ist also im ersten Falle thermo-elektrisch negativ gegen Eisen, im zweiten Falle positiv. Haben beide Löthstellen die Temperatur $275{,}8^0$ oder liegen ihre Temperaturen gleich weit oberhalb und unterhalb von $275{,}8^0$, so ist das Element Kupfer-Eisen neutral oder wirkungslos.

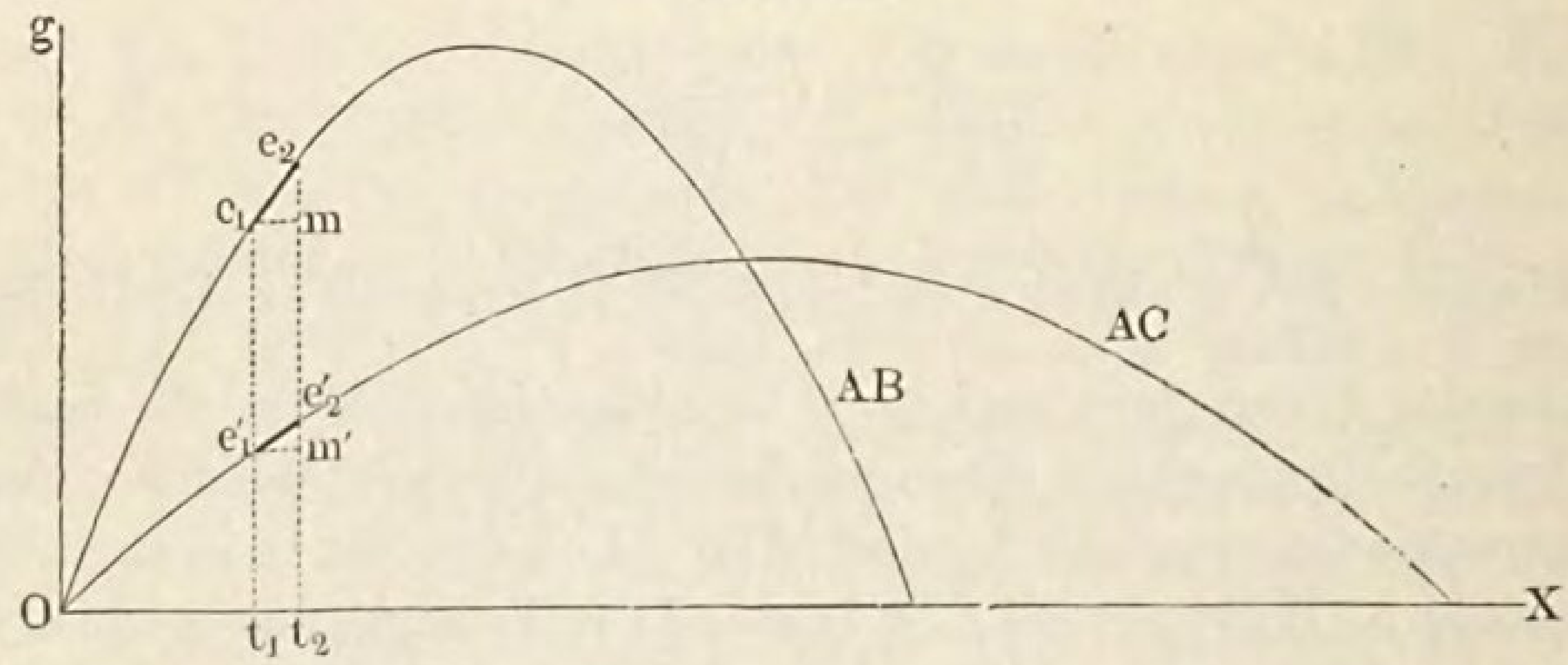
Unter „thermo-elektrischer Kraft zweier Metalle für eine Mitteltemperatur t“ versteht man nach W. Thomson die elektromotorische Kraft derselben, für den Fall, dass die Temperaturdifferenz $= 1$ und das arithmetische Mittel der Temperatur $= t$ ist, d. h. also für den Fall, dass $t_1 = t - {}^1/_2$, $t_2 = t + {}^1/_2$ ist*).

*) Richtiger nach der Ausdrucksweise der Analysis die Grösse $\frac{dE}{dt}$, das ist die Grenze des Verhältnisses zwischen der elektromotorischen Kraft und der

Diese Grösse fällt also in unserer graphischen Darstellung zusammen mit der Tangente des Neigungswinkels einer Geraden, welche die Curve an einem Punkte $x = t$ berührt. Es lässt sich nun zeigen, dass für diese thermo-elektrische Kraft ein Gesetz gilt, welches analog ist dem Gesetze der Spannungsreihe für die elektromotorische Kraft. Dasselbe lässt sich ausdrücken mit den Worten: die thermo-elektrische Kraft zweier Metalle A und B für die Temperatur t ist gleich der Differenz der thermo-elektrischen Kräfte derselben Metalle A und B gegen irgend ein drittes Metall C.

Wir wollen dies aus der graphischen Darstellung beweisen. In Fig. 821 stellen AB und AC die Curven der elektromotorischen Kräfte

Fig. 821.



zwischen den Metallen A und B und den Metallen A und C vor. Auf der Abcissenaxe sind die Temperaturen $t_1 = t - \frac{1}{2}$ und $t_2 = t + \frac{1}{2}$ aufgetragen, sodass also die Strecke $t_1 t_2 = 1$ ist. Demnach sind dargestellt:

die elektromotorische Kraft

zwischen A und B bei einer Temp.-Differenz der Löthstellen von $t_1{}^0$ durch die Ordinate $t_1 e$
„ „ „ „ „ „ „ „ „ „ $t_2{}^0$ „ „ „ $t_2 e$
„ A „ C „ „ „ „ „ „ $t_1{}^0$ „ „ „ $t_1 e$
„ „ „ „ „ „ „ „ „ „ $t_2{}^0$ „ „ „ $t_2 e$

folglich nach dem Gesetz der thermoelektrischen Spannungsreihe:

die elektromotorische Kraft

zwischen B und C bei einer Temp.-Differenz der Löthstellen von $t_1{}^0$ durch die Strecke e'_1
„ „ „ „ „ „ „ „ „ „ $t_2{}^0$ „ „ „ e'_2

Nach der oben gegebenen Definition wird dargestellt:

die thermo-elektrische Kraft

zwischen A und B bei t^0 durch die Strecke . . . $m e_2$
„ A „ C „ „ „ „ „ . . . $m' e'_2$
„ B „ C „ „ „ die Differenz der Strecken $e'_2 e_2 - e'_1 e_1$

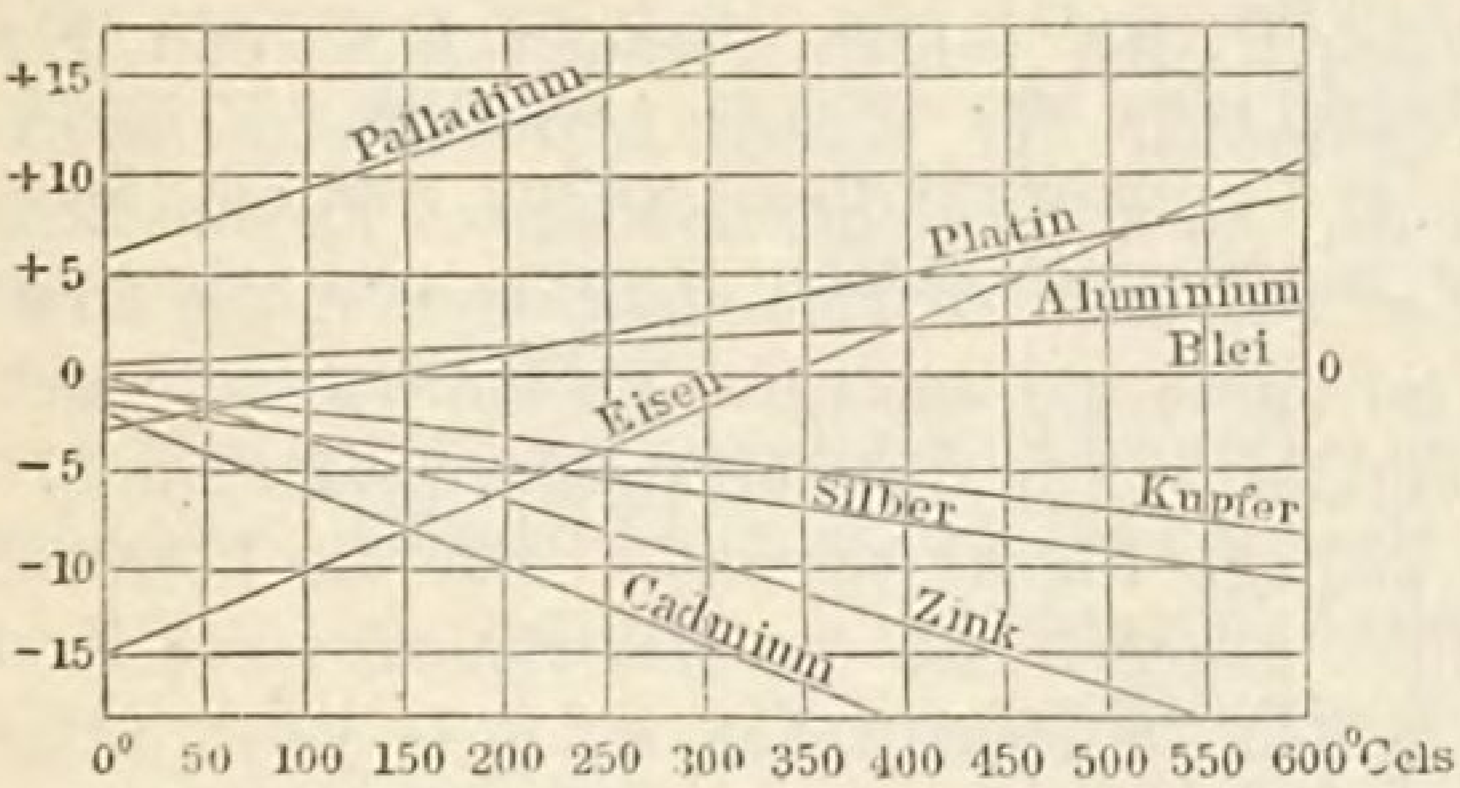
Nun ist aber $e'_2 e_2 - e'_1 e_1 = m e_2 - m' e'_2$, womit Obiges bewiesen ist.

Differenz der Temperaturen, wenn man sich letztere unendlich klein werdend denkt.

Daraus folgt nun, dass, wenn die thermo-elektrische Kraft mehrerer Metalle gegen ein Vergleichsmetall bekannt ist, man sofort die thermoelektrischen Kräfte dieser Metalle unter sich ableiten kann. Als Vergleichsmetall empfiehlt sich ein solches, für welches $\gamma = 0$ ist; dies ist nach den Versuchen von Le Roux beim Blei der Fall.

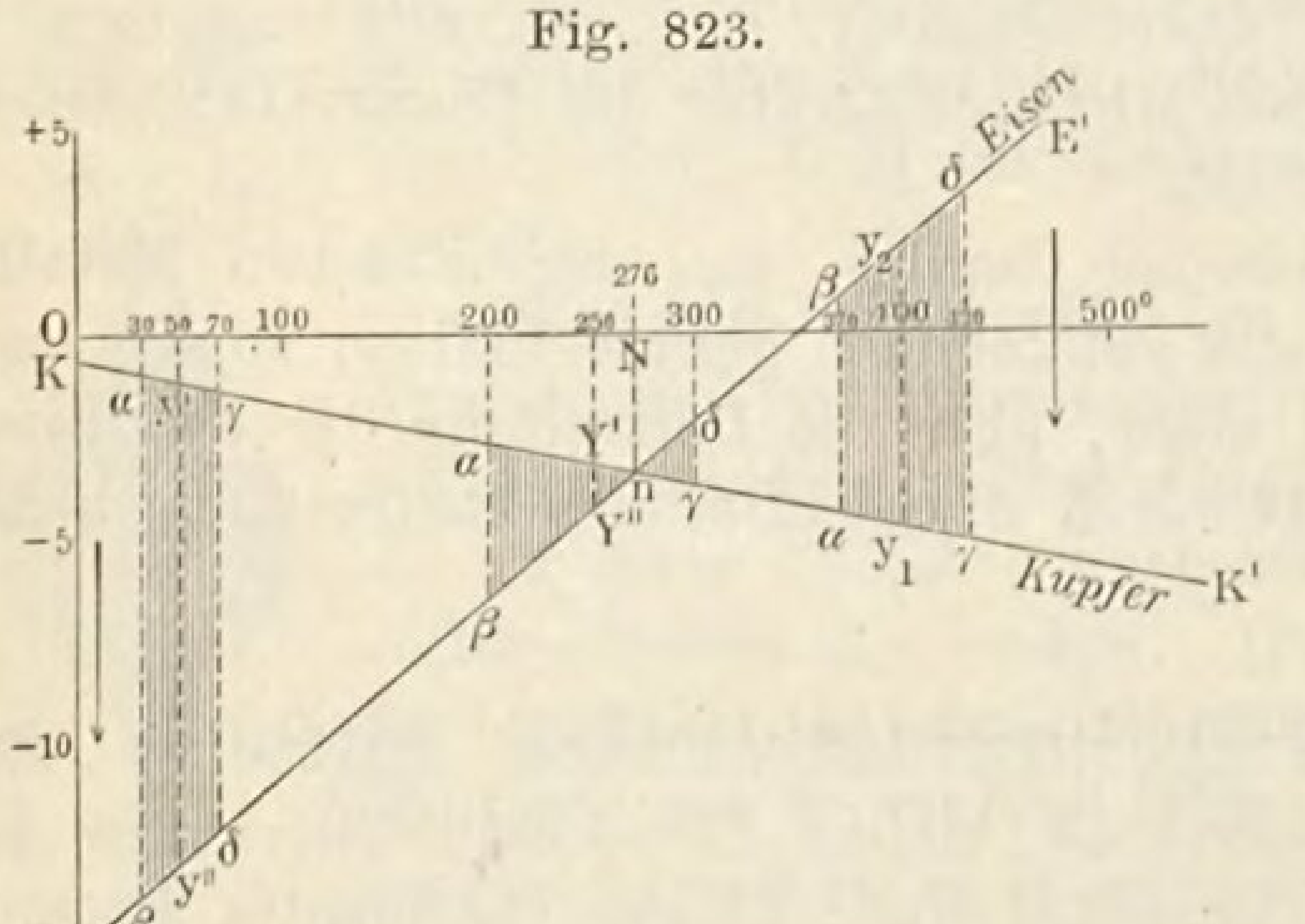
Die Fig. 822 stellt ein System thermo-elektrischer Curven vor, welche, wie ersichtlich, als gerade Linien erscheinen, was der Fall sein

Fig. 822.



muss, sobald die zugehörigen Curven der elektromotorischen Kräfte Parabeln sind. Wir wollen, um die physikalische Bedeutung dieser thermo-elektrischen Curven nochmals klar zu legen, jene für Kupfer und Eisen in Fig. 823 abgesondert und in vergrössertem Maassstabe wiedergeben. Die Zahlen auf der Abscissenaxe bedeuten die Temperaturen der Löthstellen. Die zugehörigen Ordinaten der beiden Geraden KK' und EE' die

Fig. 823.



Werthe der diesen Temperaturen (als Mitteltemperaturen) entsprechenden thermo-elektrischen Kräfte zwischen Kupfer und Blei, beziehungsweise Eisen und Blei. Folglich bedeuten die Ordinatendifferenzen der beiden Geraden ihre gegenseitigen thermo-elektrischen Kräfte für die betreffenden Mitteltemperaturen. Der Abscissenpunkt N entspricht der Neutraltemperatur 275,8°, für diesen ist daher die Ordinatendifferenz gleich Null, d. h. die Curven schneiden sich in n. Haben die beiden Löthstellen beispielsweise die Temperaturen 30 und 70, so ist die Mitteltemperatur = 50 und die Ordinatendifferenz $y' y''$ stellt die thermo-elektrische Kraft vor. Dabei geht der Strom vom Kupfer zum Eisen, was durch den Pfeil (am linkseitigen Rande) angedeutet ist. Wären die beiden Temperaturen der Löthstellen = 370° und 430°, so wäre 400° die Mitteltemperatur und die Ordinatendifferenz $y_2 y_1$ würde die Grösse der thermo-elektrischen Kraft repräsentiren. Diesmal geht der Strom

vom Eisen zum Kupfer, was also wiederum durch dieselbe Pfeilrichtung (am rechtsseitigen Rande) angedeutet wird. Wäre endlich die Temperatur der einen Löthstelle $= 200^0$, die der anderen $= 300^0$, so läge die Neutraltemperatur $N = 276^0$ zwischen beiden. Die Mitteltemperatur wäre $= 250$, die thermo-elektrische Kraft ausgedrückt durch $Y' Y''$. Der Strom ginge vom Kupfer zum Eisen.

Die thermo-elektrische Kraft multiplicirt mit der Temperaturdifferenz der Löthstellen giebt die elektromotorische Kraft des Elementes. Dieses Product ist aber in unserer graphischen Darstellung gegeben durch eine Fläche $\alpha\beta\gamma\delta$, welche zwischen den beiden Geraden KK' und EE' einerseits, zwischen den Ordinaten der beiden Löthstelltemperaturen andererseits eingeschlossen ist. So z. B. giebt das Element Kupfer-Eisen bei den Löthstelltemperaturen 30^0 und 70^0 eine elektromotorische Kraft, deren Grösse dargestellt wird durch die schattirte Fläche $\alpha\beta\gamma\delta$, welche das Ordinatenstück $y' y''$ enthält. Für die Löthstelltemperaturen 370^0 und 430^0 ergiebt sich die analoge Fläche bei $y_1 y_2$. Für die Löthstelltemperaturen 200^0 und 300^0 dagegen ist die elektromotorische Kraft durch die Differenz der beiden Dreiecksflächen $\alpha\beta n - \gamma\delta n$ ausgedrückt.

So lange die thermo-elektrischen Curven Gerade sind, ist der Flächeninhalt der so gebildeten Trapeze bei gleicher Mitteltemperatur proportional ihrer Breite nach Richtung ihrer Abscissenaxe, was mit der oben erwähnten Thatsache übereinstimmt, dass die elektromotorische Kraft des Elements bei gleicher Mitteltemperatur der Temperaturdifferenz der Löthstellen proportional ist.

Sind die thermo-elektrischen Curven, was bei manchen Metallen der Fall zu sein scheint, nicht vollkommen gerade Linien, so gilt zwar diese Proportionalität nicht mehr, aber die Darstellung der elektromotorischen Kraft des Elements durch die erwähnten Flächenräume behält ihre Gültigkeit.

248 **Messung von Temperaturdifferenzen mittelst der Thermo-Elemente.** Innerhalb kleiner Temperaturdifferenzen von wenigen Geraden an den Löthstellen eines Thermo-Elementes ist seine elektromotorische Kraft diesen Differenzen nahe proportional. Da ausserdem bei gleichem Widerstande auch die Stromstärke denselben Temperaturdifferenzen proportional ist, so kann man aus den mit einem Galvanometer beobachteten Stromstärken auf jene zurückschliessen.

Um die Galvanometerangaben zu aichen, giebt man den Löthstellen einmal eine bekannte, anderweitig gemessene Temperaturdifferenz und beobachtet den gleichzeitigen Galvanometerausschlag. Ist dieser $= \alpha$, sind die Temperaturen t_1 und t_2, so ist $\frac{t_2 - t_1}{\alpha}$ der Factor, mit dem man ein anderes Mal den beobachteten Ausschlag α' multipliciren muss, um die Temperaturdifferenz zu finden. Hält man dabei die Temperatur

der einen Löthstelle constant auf einer Höhe t_0, so findet man die zu messende Temperatur x aus der Gleichung:

$$x - t_0 = \frac{\alpha'}{\alpha}(t_2 - t_1),$$

also

$$x = \frac{\alpha'}{\alpha}(t_2 - t_1) + t_0.$$

Der Vortheil der Thermo-Elemente als Temperaturmesser beruht auf ihrer compendiösen Form und der Leichtigkeit ihrer Einführung in das Innere von Körpern, da eben nur zwei Drähte einzuführen sind, welche dabei beliebig geformt sein können. Auch entziehen solche Thermo-Elemente dem Körper, dessen Temperatur zu messen ist, keine merkliche Wärmemenge.

Ein derartiges aus einem Wismuth- und einem Antimonstäbchen gebildetes Thermo-Element ist in Fig. 824 dargestellt. Wegen der grossen Zerbrechlichkeit dieser Metalle construirt man aber solche Elemente besser aus Eisen und Platin, oder nach Poggendorff aus Eisen- und Neusilber, sei es in Form eines Drahtes, den man um die zu prüfenden Körper herumlegt, oder durch ihn hindurchzieht, oder in Gestalt von Nadeln, die man in die zu untersuchenden Körper, z. B. thierische oder pflanzliche Gewebe, einsticht.

Fig. 824.

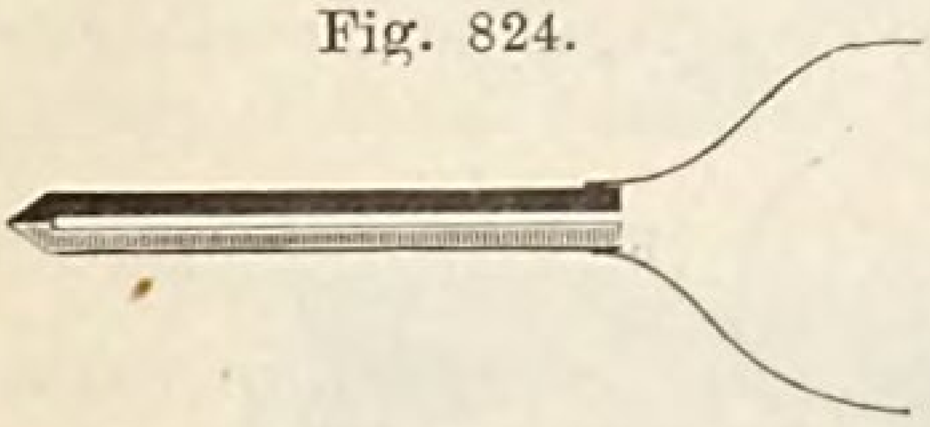


Fig. 825.



Fig. 825 stellt eine aus Eisen- und Neusilberdraht gebildete thermo-elektrische Nadel dar. Die Stelle, wo diese beiden Drähte a und b zusammengelöthet sind, ist zu einer Spitze s ausgearbeitet. Bis auf diese Löthstelle stecken die beiden, isolirt neben einander herlaufenden Drähte in einer Glasröhre; oben aber, wo die zum Multiplicator führenden Drähte c und d angelöthet sind, ist die Glasröhre noch mit einer Glaskugel umgeben, die mit Eiswasser gefüllt wird, um hier eine constante Temperatur zu erhalten.

Zur Beobachtung der durch ein derartiges Instrument erzeugten Ströme wendet man am besten ein Spiegelgalvanometer mit wenigen dicken Drahtwindungen an, dessen Widerstand dem des Thermo-Elementes nahe steht.

Thermoströme in einem Metallstücke. Verbindet man 249
die Klemmen eines zur Messung von Thermoströmen eingerichteten Galvanometers durch einen vollkommen homogenen metallischen Leiter, so tritt kein Strom auf, wenn man innerhalb desselben Temperatur-

differenzen hervorruft und zwar auch dann nicht, wenn der Abfall der Temperatur von der erhitzten Stelle nach beiden Seiten ein unsymmetrischer ist. Daraus folgt noch nicht, dass die Berührung ungleich warmer Theile desselben Metalles mit einander keine elektromotorische Kraft entwickele. Es kann eine solche Kraft vorhanden sein, aber sie muss dann einzig abhängen von der Gesammthöhe des Temperaturabfalles, nicht aber davon, ob dieser Abfall innerhalb einer kürzeren oder längeren Strecke des Leiters stattfindet.

Etwas anderes ist es, wenn der Leiter nicht vollkommen homogen ist, denn dann wirken die verschiedenartigen Theile desselben ähnlich wie verschiedene Metalle. Eine solche Ungleichförmigkeit wird z. B. schon dadurch hervorgebracht, dass man an irgend einer Stelle des Drahtes einen Knoten macht, wie Fig. 826 andeutet. Erwärmt man dann den Draht in der Nähe dieses Knotens, so entsteht alsbald ein Strom, welcher nach Becquerel's Beobachtung in einem Platindraht in der Richtung von der erwärmten Stelle zum Knoten geht, während Nobili

Fig. 826

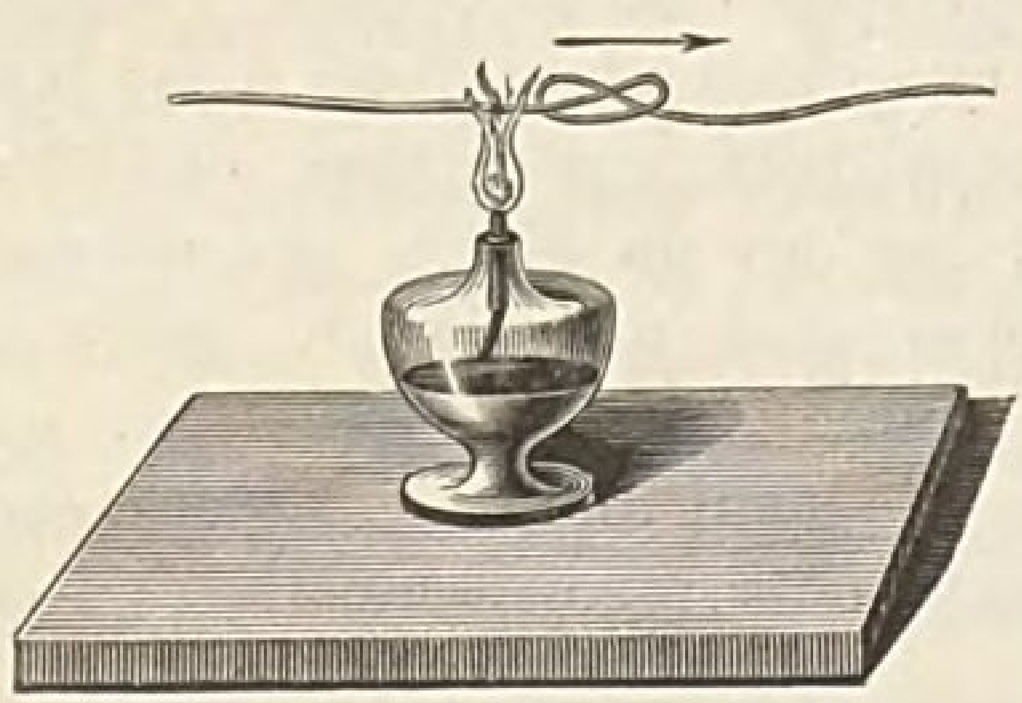
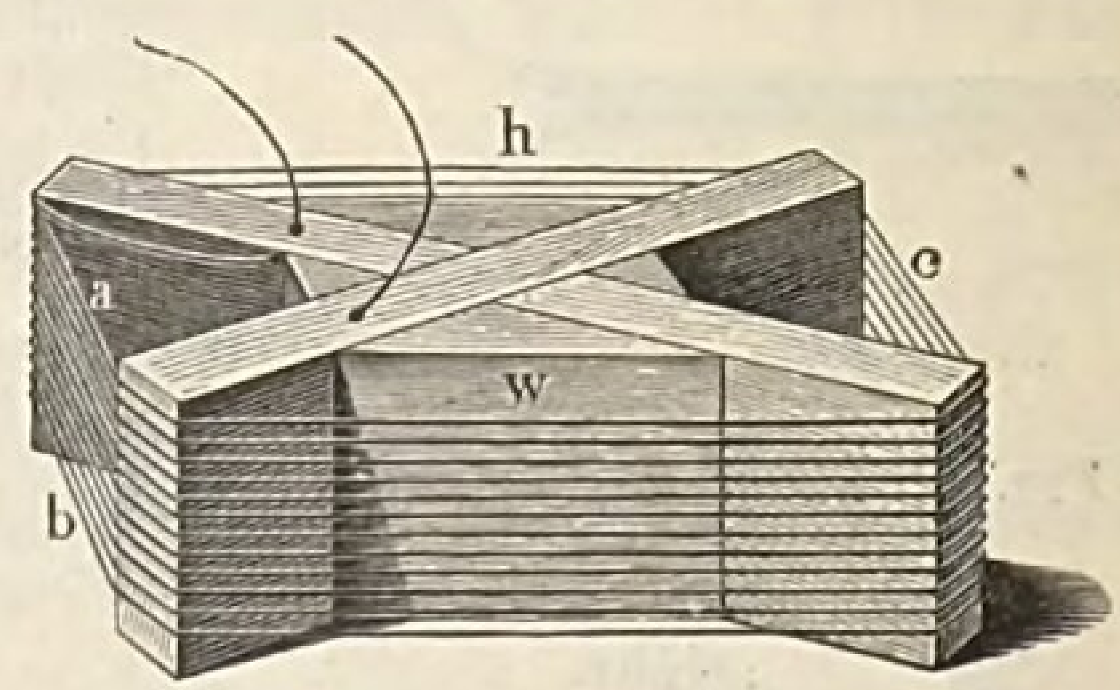


Fig. 827.



mit leichter oxydirbaren Metallen, wie Zink und Eisen, Ströme in entgegengesetzter Richtung erhielt.

Die Thermoströme zwischen gedehnten und ungedehnten Stücken desselben Drahtes wurden von W. Thomson, Le Roux und zuletzt von E. Cohn untersucht. Der letztere Physiker fand, dass die Stromstärke nicht nur von der gegenwärtigen Spannung der Drahtstücke, sondern von den oberen und unteren Grenzen, zwischen denen seit der letzten völligen Entspannung die Spannungen variirt haben, abhängt. In einem Thermo-Element aus zwei gleichen gleichgespannten Drähten, deren einer *a* zuletzt vorher ein grösseres, deren anderer *b* ein kleineres Gewicht getragen hat, geht der Strom immer von *b* nach *a*. Bei Eisen und Stahl können die vorangegangenen Spannungen selbst den Sinn beeinflussen, indem sich der Thermostrom bei zu- oder abnehmender Spannung ändert, wodurch sich frühere widersprechende Versuchsresultate von Thomson und Le Roux erklären. Als Gesammtergebniss seiner Untersuchungen kam E. Cohn zu dem Schlusse: „Ein gespannter Draht verhält sich — unter sonst gleichen Umständen — verschieden, je nachdem er vorher schwächer oder stärker gespannt war, und diese Verschiedenheit dauert bis zur nächsten Aenderung der Spannung.“

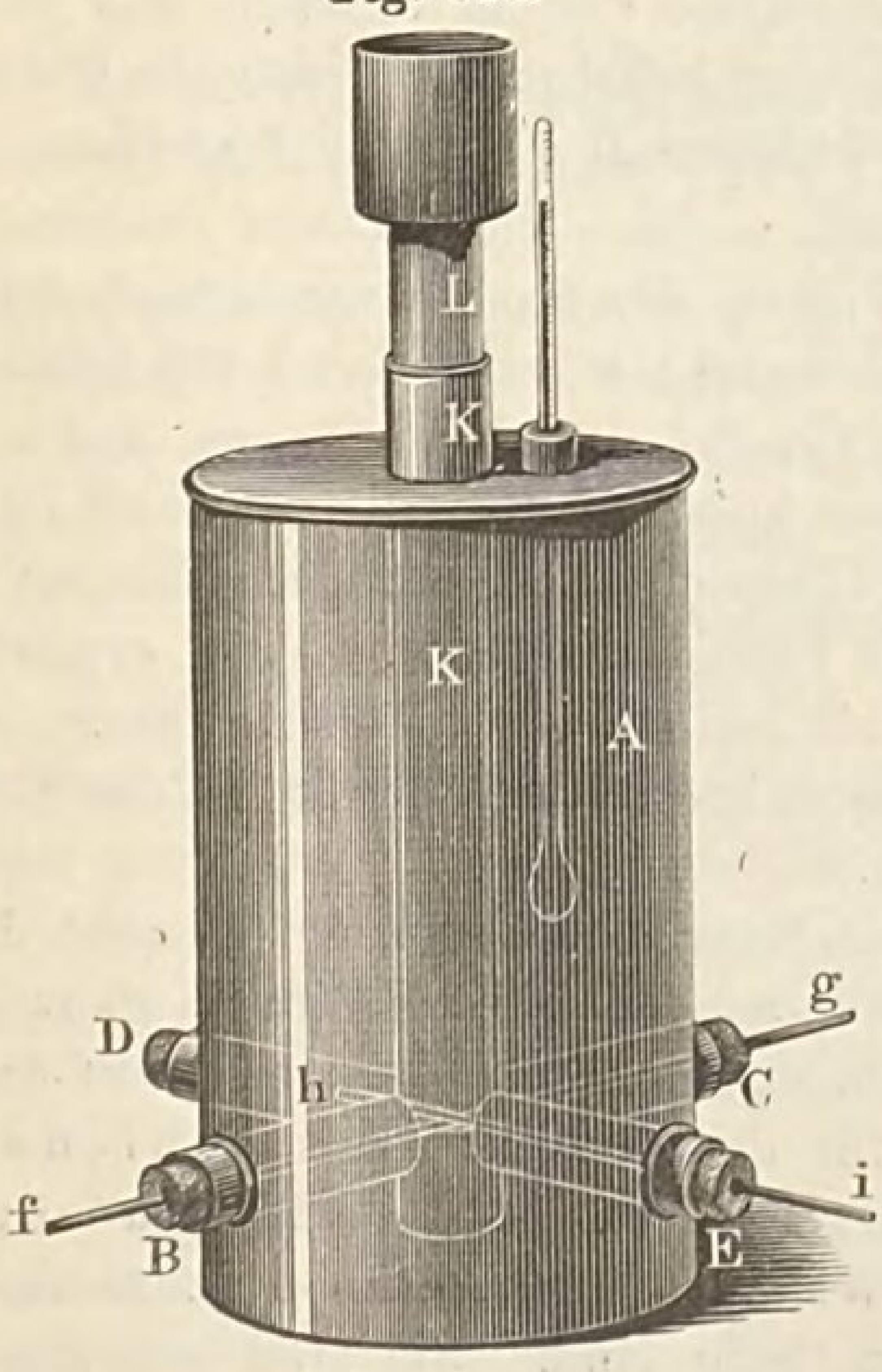
Magnus machte die Hälfte eines durch wiederholtes Ziehen gehärteten Messingdrahtes durch Ausglühen weich und verband dann seine beiden Enden mit den Enden des Galvanometerdrahtes. Beim Erwärmen der Stelle, wo der weiche und der harte Theil des Drahtes an einander stossen, erhält man einen Strom, welcher an dieser Stelle vom weichen zum harten Drahtstück geht.

Man kann die Intensität dieses Stromes sehr verstärken, wenn man gleich lange Stücke eines längeren Drahtes abwechselnd ausglüht und hart lässt, und ihn dann auf einen Holzrahmen, Fig. 827, so aufwindet, dass die harten Drahtstücke sämmtlich auf die eine Seite *h*, die weichen alle auf die entgegengesetzte Seite *w* fallen, während die Grenzen der harten und weichen Theile in den Linien *ab* und *cd* liegen (*d* vertical unter *c*, in der Figur nicht sichtbar). Verbindet man die Enden dieses Drahtes mit den Enden des Galvanometerdrahtes, so erhält man relativ starke Ströme, wenn man entweder in *ab* oder in *cd* erwärmt.

An der erwärmten Stelle geht der positive Strom vom weichen zum harten Theil bei Messing, Silber, Stahl, Kupfer, Platin; vom harten zum weichen aber bei Neusilber, Zinn, Zink und Eisen.

Thermoströme bei der Berührung kalter und warmer Leiter. 250 Wenn man zwei Stücke des nämlichen Metalls, von denen das eine kalt, das andere warm ist, mit einander in Berührung bringt, so entwickeln sie Ströme, welche von dem Temperaturunterschiede abhängig sind und mit ihm verschwinden. — Verbindet man z. B. nach Becquerel zwei gleiche Drähte von Platin mit den Leitungsdrähten des Galvanometers, so zeigt dieses einen Strom an, wenn man den einen Draht erwärmt und ihn dann mit dem kalten in Berührung bringt, und zwar geht der positive Strom an der Berührungsstelle vom warmen zum kalten Draht.

Fig. 828.

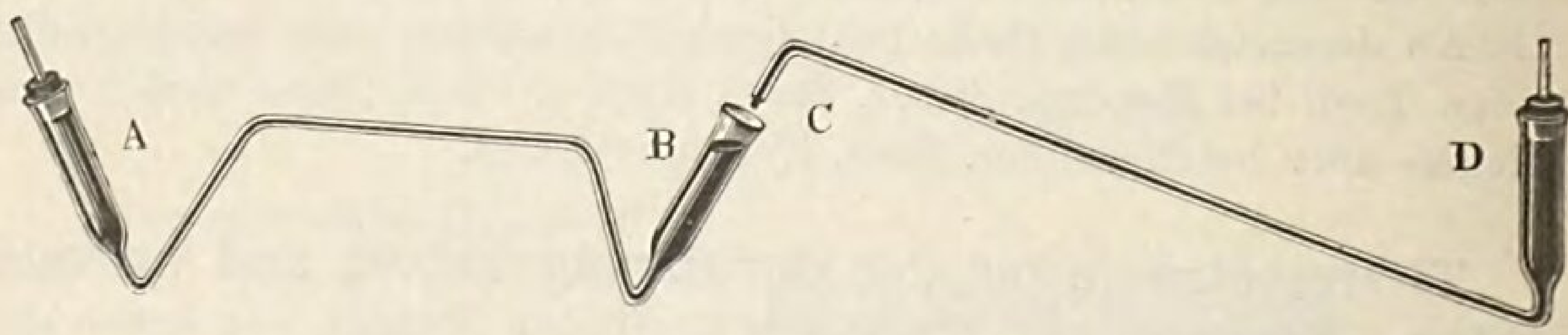


Magnus wandte zur Untersuchung dieser Ströme den in Fig. 828 abgebildeten Apparat an. In einen Blechcylinder *A* waren unten zwei sich rechtwinklig kreuzende Blechröhren *BC* und *DE* eingesetzt, in welche von oben die senkrechte Röhre *K* einmündete. Durch das Rohr *BC* war ein Draht *fg* gesteckt, dessen eines Ende mit dem einen

Ende des Galvanometerdrahtes verbunden war. Das Gefäss *A* wurde nun mit kochendem Wasser gefüllt und, nachdem der Draht *fg* dadurch erwärmt worden war, wurde in das Rohr *DE* ein auf 8° erkalteter Draht *hi* so eingesteckt, dass er auf *fg* zu liegen kam. Eine innige Berührung der beiden Drähte wurde durch einen mit Blei beschwerten Holzstab bewirkt, welcher in das verticale Rohr *K* eingesteckt wurde. Sobald man nun das hervorragende Ende *i* des kalten Drahtes mit dem anderen Ende des Galvanometerdrahtes in Berührung brachte, erfolgte ein Ausschlag der Galvanometernadel.

Dass warmes und kaltes Quecksilber keinen Strom geben, ist schon von Matteucci beobachtet. Magnus stellte den Versuch mit Quecksilber in folgender Weise an: Zwei Glasröhren *AB* und *CD* mit angeblasenen Glasgefässen, Fig. 829, wurden mit Quecksilber gefüllt, in *A*

Fig. 829.



und *D* die Galvanometerdrähte eingetaucht. Es zeigte sich kein Strom, mochte nun das Quecksilber in *B* erwärmt und in dasselbe das kalte Quecksilber der Spitze *C*, oder mochte umgekehrt das erwärmte Quecksilber der Spitze *C* in das kalte des Gefässes *B* eingetaucht werden.

251 **Thermosäulen.** Nach dem Princip der Volta'schen Säule kann man eine mehr oder minder grosse Anzahl *n* von thermo-elektrischen Elementen zu einer thermo-elektrischen Säule verbinden, und wird dann einen Strom von *n* mal so grosser elektromotorischer Kraft erhalten, als ihn bei gleicher Temperatur der Löthstellen ein einziges Element zu liefern im Stande ist, wenn man die Löthstellen 1, 3, 5 etc. erwärmt, während die dazwischen liegenden kalt bleiben. — Dieser Erklärung zufolge gehört der in Fig. 827, S. 942 dargestellte Apparat in die Kategorie der thermo-elektrischen Säulen.

Nobili construirte eine thermo-elektrische Säule, um mittelst derselben in Verbindung mit einem entsprechenden Multiplicator ganz geringe Temperaturunterschiede merklich zu machen und stellte auf diese Weise einen Apparat dar, welcher für das Studium der strahlenden Wärme von der grössten Bedeutung geworden ist. Nobili's Thermosäule ist aus 25 bis 30 Stäbchen von Wismuth und Antimon zusammengesetzt, welche ungefähr 3 bis 4 cm lang sind. Sie sind zusammengelöthet, wie man Fig. 831 sieht, nämlich so, dass alle paarigen Löthstellen auf der einen, alle unpaarigen auf der anderen Seite sich befinden. Das Ganze bildet ein kleines compactes und festes Bündel, Fig. 830,

weil die Zwischenräume zwischen den einzelnen Stäbchen mit einer isolirenden Substanz, etwa mit Gyps, ausgefüllt sind, denn sie dürfen sich natürlich nur an den Löthstellen berühren. Das Wismuthstäbchen des ersten Paares ist mit dem Stifte x, das Antimonstäbchen des letzten Paares ist mit dem Stifte y in leitender Verbindung, diese Stifte bilden also die beiden Pole der Säule; mit ihnen werden die Enden des Multiplicatordrahtes in Verbindung gebracht.

Man hat der thermo-elektrischen Säule für specielle Untersuchungen besondere Formen gegeben, die wir jedoch hier nicht näher betrachten können.

Die aus Wismuth und Antimon construirten Thermosäulen leiden an dem grossen Uebelstande, dass sie nicht allein sehr zerbrechlich sind, sondern dass sie auch keine bedeutende Temperaturerhöhung auf der einen Seite vertragen, weil man sonst Gefahr läuft, dass eine Schmelzung der Löthstellen eintritt; man hat deshalb andere thermo-elektrisch wirksame Metallcombinationen in Anwendung gebracht, welche eine bedeutende Erhitzung der Löthstellen vertragen, wie z. B. Eisen-Platin oder nach Poggendorff's Angaben Eisen-Neusilber.

Fig. 830.

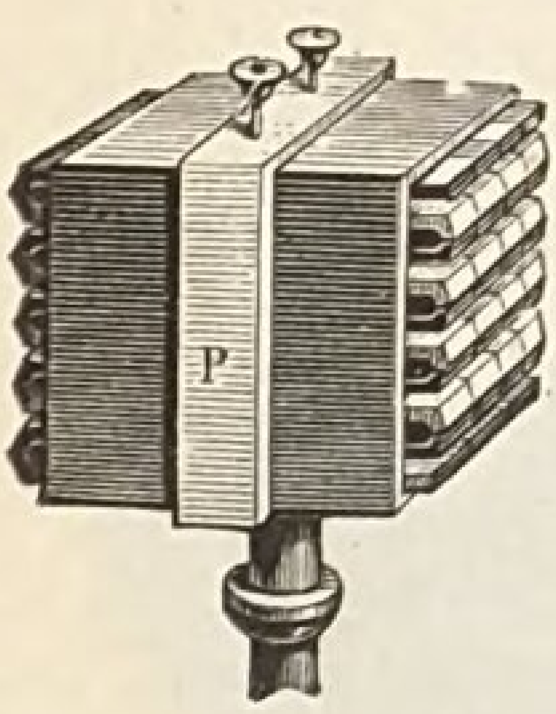
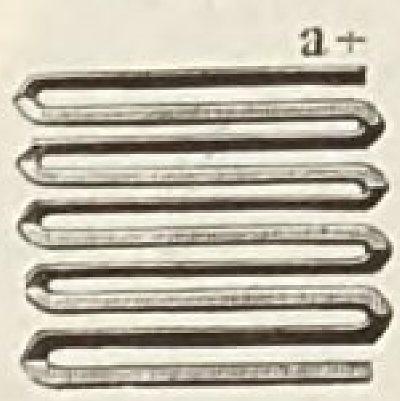


Fig. 831.



In neuerer Zeit sind unter Benutzung von Metalllegirungen bedeutend kräftigere Thermosäulen von Marcus, Fr. Noë und Clamond construirt worden, mit welchen sich sämmtliche Wirkungen wie mit den Hydroketten erzielen lassen. Die Säule von Marcus in Wien (1864) beruht auf der Anwendung folgender Legirungen:

65	Gewichtstheile	Kupfer	als negatives Metall,
3	„	Zink	
12	„	Antimon	als positives Metall.
5	„	Zink	

Erstere Legirung schmilzt bei circa 1200°, letztere bei 600°. Statt des oben genannten negativen Metalls lässt sich auch Neusilber anwenden.

Die elektromotorische Kraft eines aus diesen Legirungen gebildeten Thermo-Elementes ist bei der höchsten zulässigen Temperatur nach Stefan's Bestimmungen gleich $^1/_{18}$ von der elektromotorischen Kraft eines Daniell'schen Bechers.

Eine Batterie von 125 solchen Elementen war im Stande, in einer Minute 25 ccm Knallgas zu entwickeln und einen Platindraht von $^1/_2$ mm Dicke glühend zu machen. Eine Säule von 30 Elementen aber konnte einen Elektromagnet von 70 kg Tragkraft erzeugen.

Fig. 832 (a. f. S.) stellt eine Marcus'sche Thermosäule von 16 Elementen dar (meistens bestehen sie aus 20 Elementen). Auf jeder Seite einer

eisernen Platte *ab* sind 8 Streifen von Neusilber aufgeschraubt (ohne jedoch mit dem Eisenstab oder unter sich in leitender Verbindung zu stehen), welche 18 mm breit, 18 cm lang und gegen 2 mm dick sind. Gleich unterhalb des Eisenstabes *ab* sind sie nach der Seite gebogen, und zwar auf der einen Seite nach links, auf der anderen nach rechts, so dass sie gleichsam ein Dach bilden. Die positiven Stäbe, welche ihrer schlechten Leitungsfähigkeit sowie ihrer Sprödigkeit wegen 25 mm dick sind, haben eine Länge von 15,5 cm.

Fig. 832.

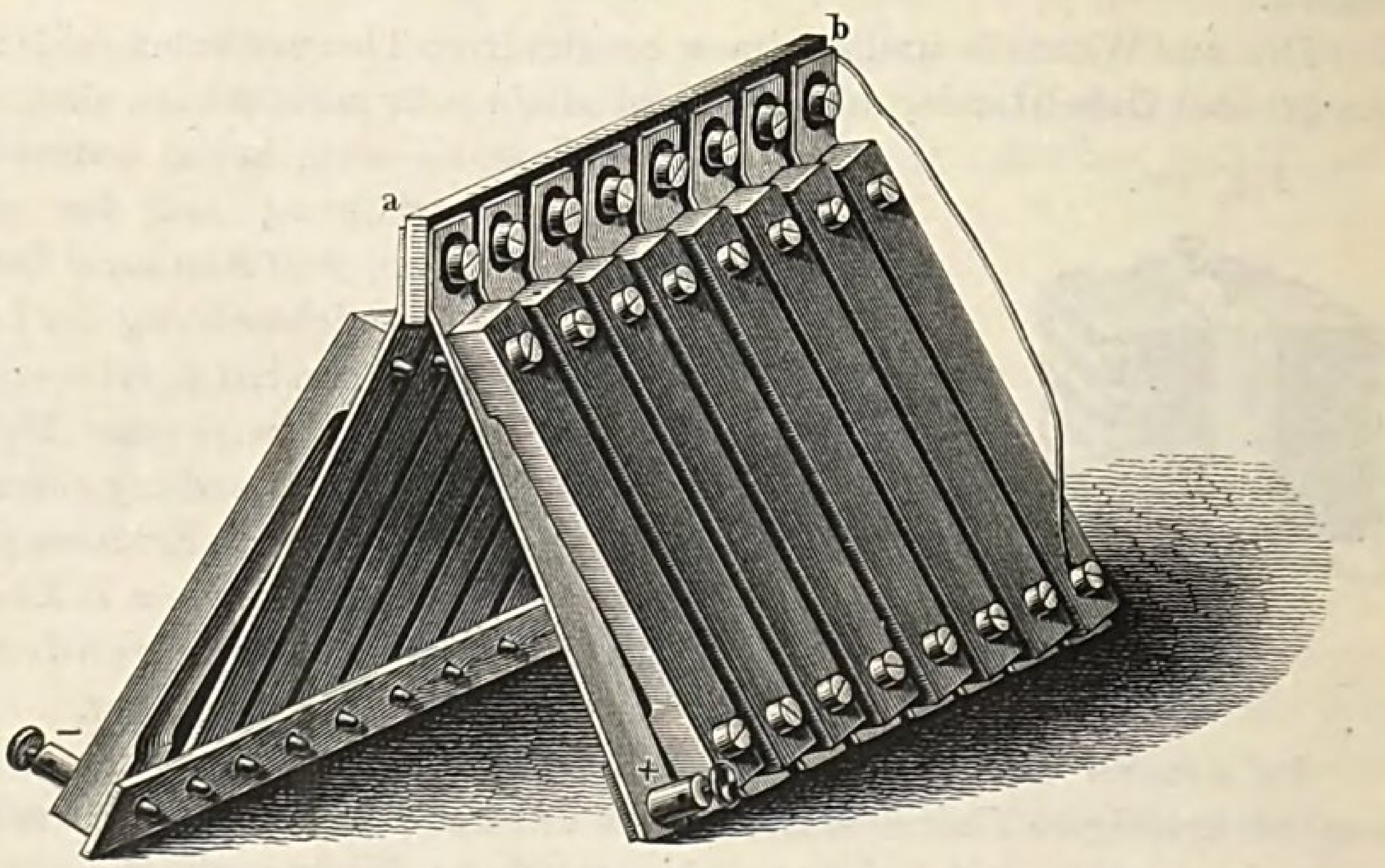
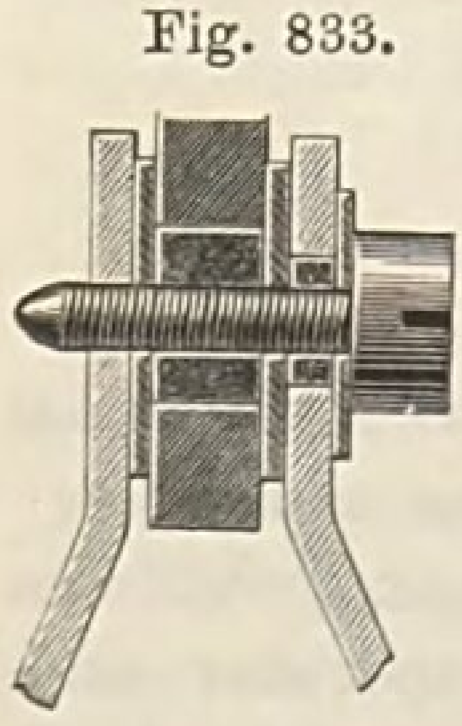


Fig. 833 zeigt, wie die Neusilberstreifen auf dem Eisenstabe *ab* befestigt sind. Das Gewinde der Schraube greift nur in die Neusilberplatte auf der linken Seite ein. Die Eisenplatte und der Neusilberstreifen auf der rechten Seite haben grössere Oeffnungen, welche mit Thoncylindern ausgefüllt sind, durch deren Mitte die Schraubenspindel hindurchgeht. Die Berührung der Neusilberplatten und der Eisenplatte ist durch zwischengelegte Glimmerplatten verhindert. Ebenso ist die Neusilberplatte rechts durch Glimmer vor der Berührung mit dem Schraubenkopf geschützt.

Fig. 833.



Die unteren Enden der Metallstäbe sind auf einen Streifen von K a m m m a s s e aufgeschraubt.

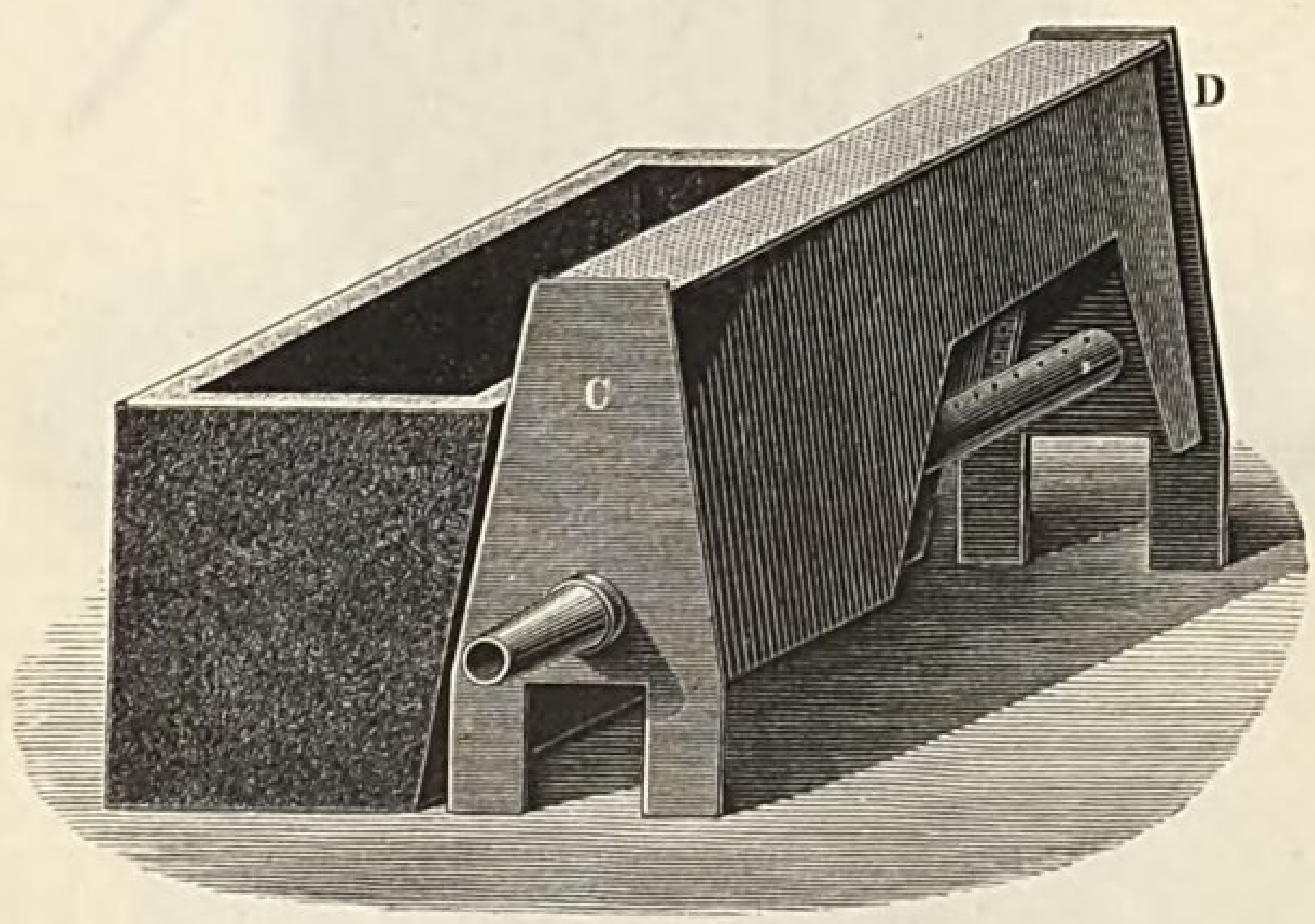
Die Erhitzung der oberen Berührungsstellen geschieht durch den Gasbrenner *CD*, Fig. 834, ein unten offener, oben durch ein doppeltes Drahttuch geschlossener Kasten von Schwarzblech. Durch die ganze Länge des Kastens geht unten ein Messingrohr hindurch, welches oben mit einer Reihe feiner Oeffnungen versehen ist. Das durch diese Oeffnungen ausströmende Gas mischt sich innerhalb des Kastens mit atmosphärischer Luft und kommt oberhalb des Drahttuches zur Verbrennung.

Besser ist es, wenn der Kasten unten nicht ganz offen, sondern wenn er hier mittelst eines durchlöcherten Bleches geschlossen ist.

Auf jeder Seite des Gasbrenners *CD* steht ein Gefäss von gebranntem Thon. Unsere Figur zeigt das auf der linken Seite stehende, während das andere weggelassen ist. In diese kaltes Wasser enthaltenden Gefässe sind die unteren Berührungsstellen der Thermosäule eingetaucht.

Die Thermosäule von Marcus hat den Nachtheil grosser Zerbrechlichkeit der angewandten Antimon-Zinklegirung, ferner ziemlich grossen Widerstandes, der durch den Gebrauch der Säule sich allmälig noch mehr vergrössert. Ungleich günstigere Resultate giebt die Thermosäule von Fr. Noë in Wien, welche seit dem Tode dieses Erfinders von Rebicek in Prag fabricirt wird. Fig. 835 (a. f. S.) zeigt eine solche Noë'sche Säule in sternförmiger Anordnung in perspectivischer Zeichnung, Fig. 836 im

Fig. 834.



Grundriss. Dieselbe besteht aus 20 Thermoelementen, welche radienförmig auf einem Ringe aus isolirendem Materiale *b* befestigt sind. *m* stellt das in Cylinderform gegossene spröde, aus Antimon und Zink bestehende positive Metall vor, *n* das dem Neusilber ähnliche, in Form eines doppelten (oder mehrfachen) Drahtes angewendete positive Metall. Bei *a* ist die warme Contactstelle des Elementes, welche nicht direct, sondern dadurch erhitzt wird, dass ein Kupferstift *h* in den Cylinder *m* eingegossen ist, welcher durch Leitung die Wärme zuführt. Die Abkühlung an der entgegengesetzten Seite geschieht durch eine kupferne Armatur *k*, welche mit der ebenfalls kupfernen Blechspirale *r* in wärmeleitender Verbindung steht. Letztere bringt einen Luftzug und hierdurch eine Luftkühlung zu Stande, welche die Anwendung von Kühlwasser entbehrlich macht. Im Centrum der Vorrichtung sind die centralen Enden der Kupferheizstifte zwischen zwei kreisförmige Glimmerplatten gefasst, wodurch bewirkt wird, dass die Flamme eines untergestellten Bunsen'schen Brenners sich ausbreitet und die Heizstifte zum Glühen erhitzt. Statt des Gasbrenners kann auch eine Spirituslampe

benutzt werden. Der positive Poldraht ist bei k, der negative bei n' befestigt.

Nach A. v. Waltenhofen's Messungen ist bei normaler Erhitzung die elektromotorische Kraft eines Einzelelementes ungefähr = 0,1 Volt,

Fig. 835.

$\frac{1}{4}$

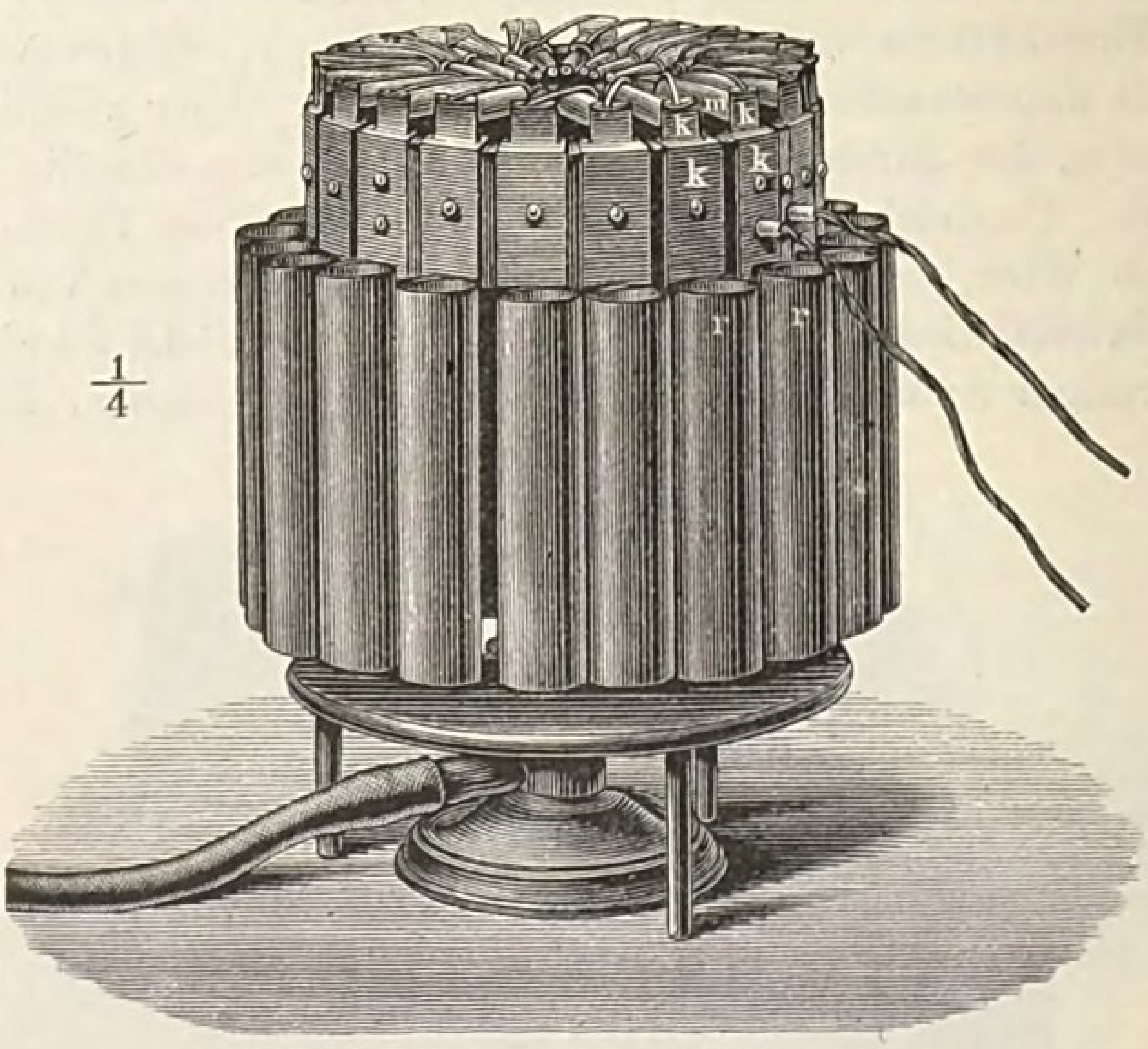
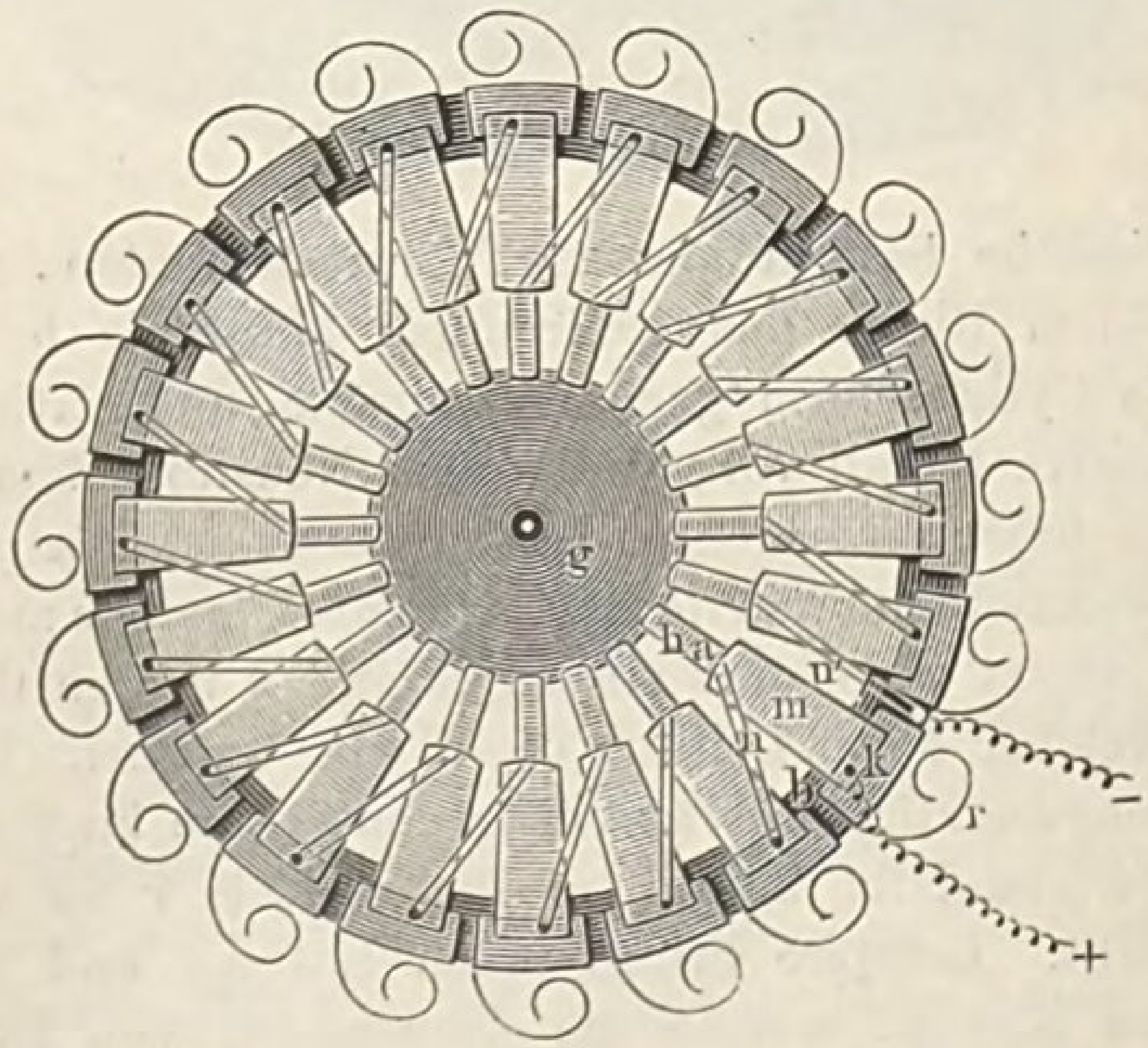


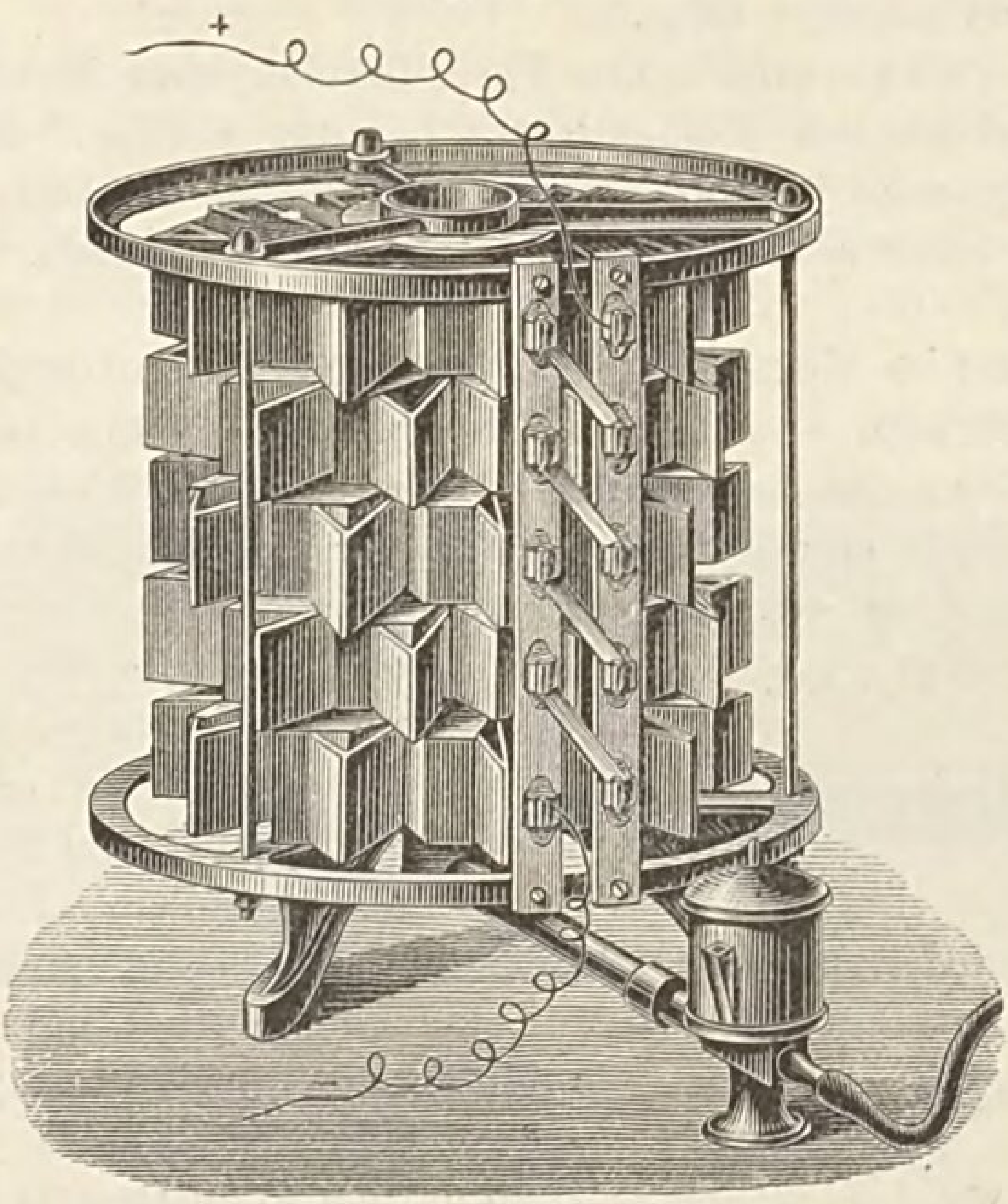
Fig. 836.



der Widerstand = 0,05 Ohm. Die ganze Säule hat also ungefähr die elektromotorische Kraft 2 Volt, wie ein Bunsen'sches Element, und den Widerstand = 1 Ohm. Spätere verbesserte Säulen hatten nur mehr die Hälfte dieses Widerstandes, nämlich 0,024 Ohm per Element.

Ausser den sternförmig angeordneten Säulen baute Noë auch solche mit zahlreicheren Elementen in geradliniger Anordnung, bei welchen überdies durch ein passend angebrachtes Pachytrop verschiedene Combinationen mit grösserer und geringerer elektromotorischer Kraft und geringerem oder grösserem Widerstande hergestellt werden können. Die Erhitzung geschieht durch eine geradlinige Reihe von Bunsenbrennern, deren Gaszufluss durch eine Sicherheitsvorrichtung regulirt wird. Durch Anwendung einer Anzahl solcher Noë'scher Thermosäulen ist es A. v. Waltenhofen gelungen, elektrisches Kohlenlicht zu erzeugen.

Fig. 837.



Clamond's Thermosäule ist in Fig. 837 abgebildet. Die Elemente dieser Säule bestehen einerseits aus einer Legirung von 2 Theilen Antimon und 1 Theil Zink, andererseits aus verzinntem Eisen. Die Verbindung beider ist durch Guss bewerkstelligt. Eine kreisförmig angeordnete Reihe solcher Elemente wird durch einen Kitt aus Asbest und Natronwasserglas verbunden und bildet so einen Kranz. Auf diesen wird, durch denselben Kitt isolirt, ein zweiter bis fünfter Kranz aufgesetzt. Die Polenden aller einzelnen Kränze können ausserhalb der so entstandenen cylinderförmigen Säule nach Belieben verbunden werden. Die Heizung erfolgt in der centralen cylindrischen Höhlung mittelst eines Bunsenbrenners, auf welchen ein hohler Thoncylinder mit vielen Seitenöffnungen aufgesetzt ist, durch welche letzteren das Gas in vielen kleinen Flammen herausbrennt. Zwischen diesem Brenner und den Contact-

stellen ist noch ein eiserner Schutzmantel angebracht, welcher die Ueberhitzung der Elemente verhindert. Die Heizung kann übrigens auch auf Coaks oder Holzkohle, sowie auch auf Petroleum eingerichtet werden.

Eine Clamond'sche Säule von 100 Elementen, welche 230 l Gas pro Stunde verbrennt, hat bei einem inneren Widerstande von ungefähr 1 Ohm die elektromotorische Kraft 2,1 Volt. Eine solche Säule mit 240 Elementen, welche 125 l Gas pro Stunde verbrennt und $5^1/_2$ Ohm Widerstand besitzt, entwickelt eine elektromotorische Kraft von $11^1/_2$ Volt. Endlich sind Säulen gebaut, welche bei einem Verbrauch von 2 kg Coaks per Stunde eine elektromotorische Kraft von 19 Volt entwickeln; ihr Widerstand ist gegen 4 Ohm.

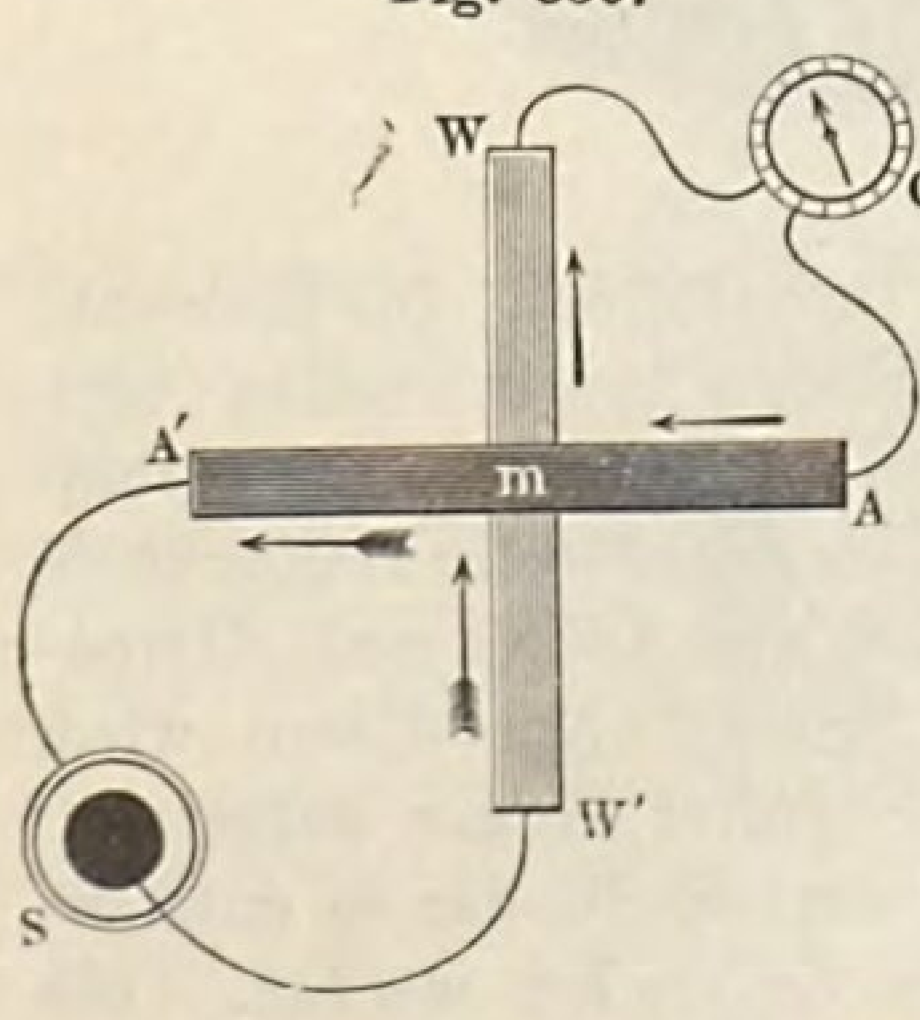
Auch die Clamond'schen Thermosäulen sind bereits zur Erzeugung des elektrischen Kohlenlichtes benutzt worden. Man verwendet dazu vier Säulen zu je 400 Elementen, welche zusammen per Stunde 3,2 cbm Gas verzehren und 50 Bunsenelemente ersetzen.

252 **Peltier's Versuch; Kälteerzeugung durch den elektrischen Strom.** Peltier machte zuerst die überraschende Beobachtung, dass an der Berührungsstelle zweier verschiedener zusammengelötheter Metalle eine Erwärmung oder eine Erkaltung erfolgt, je nachdem man einen elektrischen Strom von angemessener Stärke in der einen oder in der anderen Richtung hindurchgehen lässt. — Den Versuch stellte er in folgender Weise an. Ein Stab von Wismuth und ein solcher von Antimon, deren jeder ungefähr 11 cm lang war und einen Querschnitt von 16 qmm hatte, wurden so auf einander gelöthet, dass sie ein Kreuz bildeten; an der Kreuzungsstelle waren sie in einander gefügt; jeder einzelne Stab hatte also die Gestalt Fig. 838. Die Fig. 839 stellt das ganze Kreuz, und zwar der dunkel schraffirte Arm den Antimonstab, der helle Arm den Wismuthstab dar. Wird nun zwischen die Stabenden W und A ein Multiplicator G eingeschaltet, wie dies in der Figur angedeutet ist, so wird dessen Nadel nach der einen Seite ausschlagen, wenn man die Löthstelle bei m erwärmt, nach der anderen, wenn man sie erkaltet, und zwar hat der durch das Galvanometer angezeigte Strom die Richtung der ungefiederten Pfeile, wenn die Löthstelle bei m erkaltet wird.

Fig. 838.



Fig. 839.

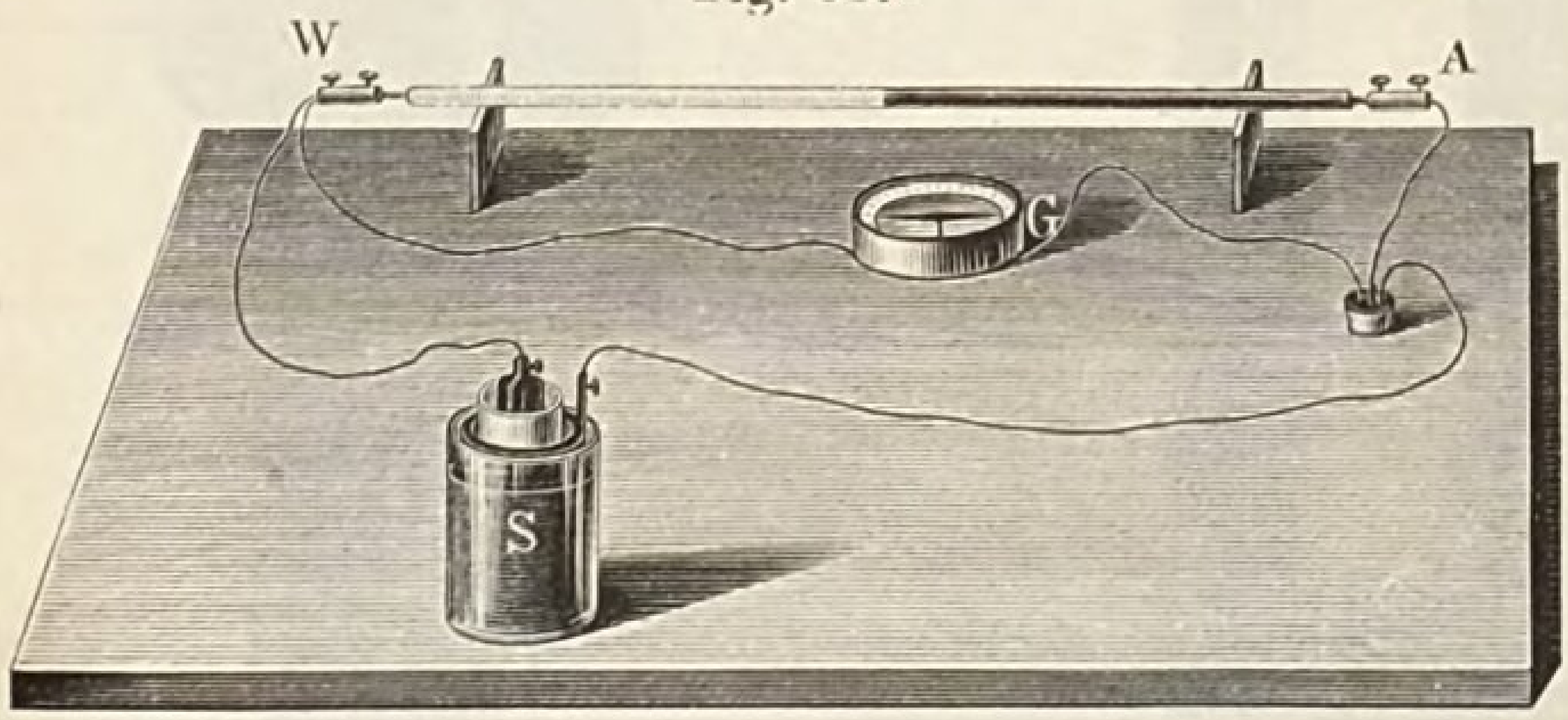


Nun aber verband Peltier A' mit dem einen, W' mit dem anderen Pole eines Volta'schen Elementes S, so dass ein Strom die Arme

$A'm$ und $m\,W'$ durchlief. Auch jetzt wurde die Multiplicatornadel abgelenkt, und zwar zeigte die Ablenkung eine Erwärmung bei m an, wenn der positive Strom von A' über m nach W' ging, eine Erkaltung, wenn er in der entgegengesetzten, durch die gefiederten Pfeile angedeuteten Richtung circulirte.

Die durch den galvanischen Strom hervorgebrachte Erkaltung an der Löthstelle zweier verschiedener Metalle lässt sich auch in der durch die Fig. 840 erläuterten Weise zeigen. Ein zur Hälfte aus Wismuth, zur Hälfte aus Antimon bestehender Stab WA wird mittelst eines Quecksilbernäpfchens zuerst in den Schliessungsbogen eines Bunsen'schen Bechers S, und nach Unterbrechung des von S durchgesendeten Stromes in den WA-Schliessungsbogen des Galvanometers G gebracht. War der positive Strom des Bechers S in der Richtung vom Wismuth zum Antimon durch den Stab WA gegangen, so zeigte nachher die Ablenkung des Galvanometers einen im Stab WA vom Antimon zum Wismuth gehenden Strom, also eine Erkaltung der Löthstelle an.

Fig. 840.



Bei dieser Vorrichtung darf das Galvanometer nicht gleichzeitig mit dem Becher S in den Schliessungsbogen des Stabes WA eingeschaltet sein, weil sonst das Galvanometer eine Nebenschliessung für den hydroelektrischen Strom des Bechers S bilden würde, was bei dem Peltier'schen Kreuz fast gar nicht der Fall ist. Bei dem Peltier'schen Kreuz kann ohne Anstand das Galvanometer G in den Schliessungsbogen der Arme Wm und mA eingeschaltet sein, während gleichzeitig der Strom des Bechers S die Arme $W'm$ und mA' durchläuft. Beim Peltier'schen Kreuz lässt sich deshalb ein fester Stand der Galvanometernadel beobachten, während man bei der Vorrichtung Fig. 840 nur die allmälig abnehmende Nachwirkung des hydroelektrischen Stromes auf die Löthstelle beobachtet.

Die Erkaltung einer Löthstelle durch einen elektrischen Strom hat Peltier auch mit Hülfe des Apparates Fig. 841 (a. f. S.) direct nachgewiesen. Durch die eine Kugel eines Differentialluftthermometers geht luftdicht ein Stäbchen hindurch, dessen eine Längshälfte Wismuth, dessen andere Antimon ist. Lässt man einen galvanischen Strom durch das Stäbchen

hindurchgehen, so zeigt das Sinken der Flüssigkeit im Schenkel rechts eine Erwärmung der Löthstelle an, wenn der positive Strom vom Antimon zum Wismuth geht; lässt man aber den Strom in entgegengesetzter Richtung circuliren, so steigt die Flüssigkeit in der Röhre, deren Kugel das Metallstäbchen enthält, was eine Erkaltung der Löthstelle anzeigt.

Bei diesem Versuche darf aber der Strom nicht über eine gewisse Stärke haben, da sonst die durch den Peltier-Effect hervorgerufene Abkühlung durch die Joule'sche Stromwärme übercompensirt wird, wie wir weiter unten näher zeigen werden. Man bedient sich daher zweckmässiger des in Fig. 842 abgebildeten Apparates, welcher auf einem zuerst von Edlund angewendeten Kunstgriffe beruht und nach den An-

Fig. 841.

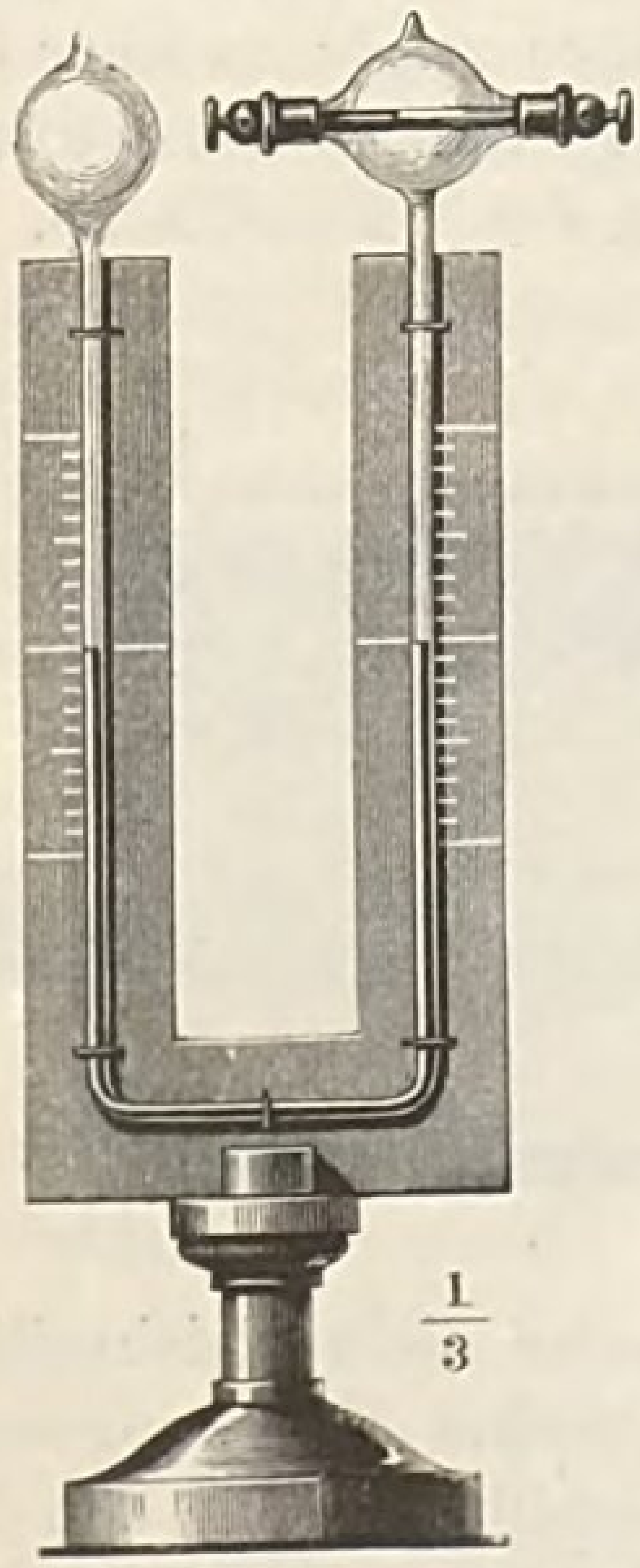
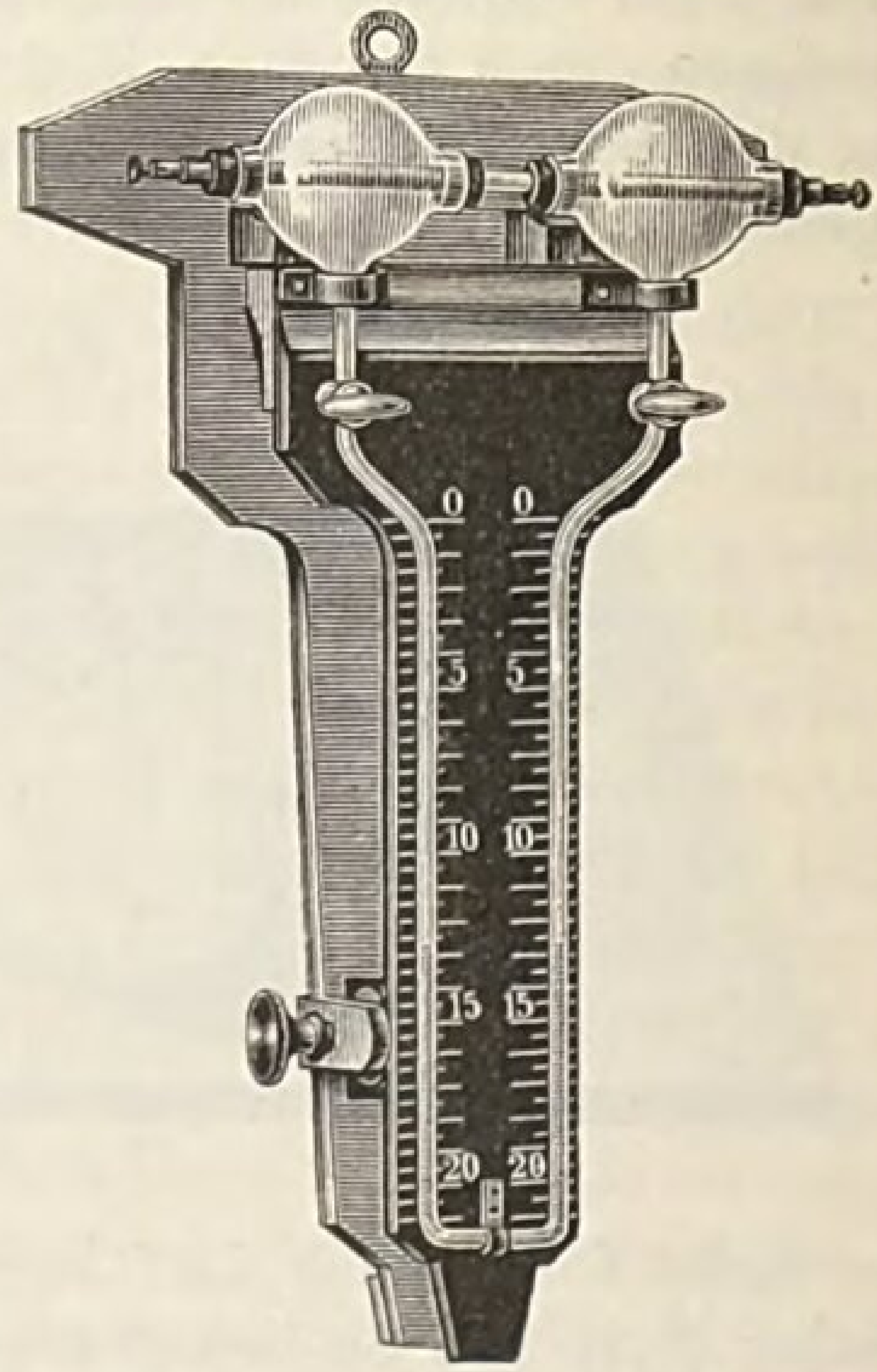


Fig. 842.



gaben von Prof. Schumann von T. Ernecke in Berlin ausgeführt wird. Er unterscheidet sich von dem in Fig. 841 dargestellten dadurch, dass an das Antimonstäbchen zu beiden Seiten Wismuthstäbchen angelöthet sind. Diese beiden Löthstellen sind in die beiden Kugeln des Luftthermometers eingeschlossen, so dass die Joule'sche Wärme in beiden Kugeln in gleicher Weise, der Peltier'sche Effect aber in entgegengesetzter Weise zur Wirkung gelangt. Dadurch wird die Wirkung der Joule'schen Wärme auf das Manometer compensirt, während der Peltier'sche Effect verdoppelt zur Wirkung gelangt. Durch Neigung des Differentialthermometers gegen die Horizontalebene lässt sich die Empfindlichkeit des Apparates noch weiter steigern, so dass beim Hindurchleiten entgegengesetzter Ströme, die nun auch eine beliebige Stärke haben dürfen, sofort entgegengesetzte Ausschläge erfolgen. Die beiden Hähne

gestatten vor Anstellung des Versuches das Gleichgewicht der Drucke herzustellen, indem man sie gleichzeitig ein wenig lüftet.

Lenz machte an der Löthstelle eines Wismuth- und Antimonstabes ein Loch, füllte es mit Wasser und legte den Stab auf schmelzenden Schnee, mit welchem er auch die übrigen Theile desselben, mit Ausnahme der Löthstelle, bedeckte. Die Stange erhielt dadurch natürlich eine Temperatur von 0^0, welche auch ein in das Wasser der Löthstelle eingetauchtes Thermometer angab. Als aber der Stab so zwischen die Pole eines Volta'schen Elementes eingeschaltet wurde, dass der positive Strom vom Wismuth zum Antimon ging, war das Wasser im Loche der Löthstelle nach fünf Minuten vollständig gefroren, und das Thermometer sank auf — $3{,}5^0$.

Peltier war anfangs der Meinung, dass das fragliche Phänomen von den Leitungsverhältnissen der zusammengelötheten Metalle abhängig sei; Poggendorff aber hat gezeigt, dass sie durch die thermoelektrischen Beziehungen der zusammengelötheten Metalle bedingt sei. Eine Erkaltung der Löthstelle tritt ein, wenn man durch dieselbe einen elektrischen Strom hindurchsendet, welcher gleiche Richtung mit dem durch Erwärmen der fraglichen Löthstelle erzeugten Thermostrome hat, eine Erwärmung der Löthstelle tritt dagegen ein, wenn man den Strom in entgegengesetzter Richtung hindurchsendet.

Wir können daher auch hier ein dem Gesetze von Lenz analoges Gesetz aussprechen:

I. Ein Strom erzeugt an der Löthstelle eine solche Wärmewirkung, welche für sich einen entgegengesetzten Strom hervorrufen würde, welche also schwächend auf den Strom zurückwirkt.

II. Eine Wärmewirkung an der Löthstelle erzeugt einen Strom, welcher für sich eine entgegengesetzte Wärmewirkung hervorrufen würde.

Es ist dies auch analog mit der polarisirenden Wirkung eines Hydrostromes. Auch dieser bringt eine chemische Wirkung in der Kette hervor, welche für sich allein einen entgegengesetzten Strom erzeugen würde, also schwächend auf den Strom zurückwirkt.

Die Abhängigkeit dieser eigenthümlichen, nur an den Löthstellen auftretenden thermischen Wirkung von der Stärke des sie hervorrufenden Stromes haben Quintus Icilius, Frankenheim, Edlund, Le Roux und v. Waltenhofen untersucht.

Quintus Icilius liess den durch eine Tangentenbussole gemessenen Strom eines Bunsen'schen Bechers durch eine aus 32 Wismuth- und Antimonstäben gebildete Thermosäule gehen; durch diesen primären Strom wurde die Hälfte der Löthstellen (etwa die paarige) erwärmt, während die andere Hälfte derselben eine Erkaltung erfuhr. War nun dadurch, dass der primäre Strom eine Zeit lang durch die Säule hindurchgegangen war, eine genügende Temperaturdifferenz der alternirenden Löthstellen erzielt worden, so wurde nun der primäre Strom unter-

brochen und die Thermosäule durch ein Spiegelgalvanometer geschlossen, dessen Magnet nun durch den Thermostrom der Säule abgelenkt wurde. Eine constante Ablenkung konnte aber natürlich hier nicht eintreten, da die durch den primären Strom hervorgerufene Temperaturdifferenz der Löthstellen nach dessen Unterbrechung ziemlich rasch abnimmt. Es wurden deshalb die Grenzlagen von sechs auf einander folgenden Oscillationen des im Galvanometer aufgehängten Magnets beobachtet und aus diesen Beobachtungen auf die ursprüngliche Stärke des Thermostromes geschlossen. Auf diese Weise ergab sich nun, dass der Thermostrom der Wismuth-Antimonsäule, also auch die Temperaturdifferenz der alternirenden Löthstellen der Stärke des sie hervorrufenden primären Stromes einfach proportional ist. Die Temperaturveränderungen, welche der primäre Strom an den Löthstellen bewirkt, folgen also einem ganz anderen Gesetz, als die durch den Strom in metallischen Leitern überhaupt entwickelte Wärme, denn letztere ist, wie wir in §. 147 gesehen haben, nach dem Joule'schen Gesetze dem Quadrate der Stromstärke proportional.

Zu dem gleichen Resultate gelangte auch Frankenheim*) auf einem ganz anderen Wege. Er wandte zu seinen Versuchen verschiedene Metallcombinationen in Form des Peltier'schen Kreuzes an. Zwischen den Armen A' und W', Fig. 839, S. 950, wurde ausser dem galvanischen Becher S noch eine Tangentenbussole und ein Commutator eingeschaltet, während sich ein Galvanometer G im Schliessungsbogen zwischen A und W befand.

Als der primäre Strom, dessen Stärke durch Veränderung des eingeschalteten Widerstandes regulirt wurde, so durch die Kreuzungsstelle hindurchging, dass hier eine Erwärmung erfolgte, wurde das Galvanometer abgelesen; dann wurde der primäre Strom umgekehrt und bei unveränderter Stärke desselben die der Erkaltung der Kreuzungsstelle entsprechende Stellung der Galvanometernadel beobachtet.

Die folgende kleine Tabelle giebt an, welches für ein Wismuth-Antimonkreuz, welches aus 4,5 mm dicken cylindrischen Stäben gebildet war, die aus der Ablenkung des Galvanometers berechneten Stromstärken i und i' waren, als der primäre Strom von der Stärke J (gemessen durch die Tangente des Ablenkungswinkels der Tangentenbussole) in der einen oder der anderen Richtung durch die Kreuzungsstelle ging, und zwar entspricht i der Erwärmung, i' der Erkaltung der Kreuzungsstelle.

*) Pogg. Ann. XCI.

J	i	i'	b	a	$a:J$
0,333	0,104	— 0,093	0,005	0,098	0,328
0,782	0,279	— 0,194	0,042	0,236	0,302
1,391	0,506	— 0,305	0,101	0,405	0,299
2,123	0,988	— 0,272	0,358	0,630	0,297

Mittel 0,306.

Die den Stromstärken i und i' proportionalen Erwärmungen und Erkaltungen der Löthstelle sind das Resultat des Zusammenwirkens zweier verschiedener Wärmeprocesse, welche der primäre Strom hervorbringt. Zunächst bewirkt er eine von der Stromesrichtung ganz unabhängige Erwärmung des ganzen metallischen Schliessungsbogens, welche, wie bereits erwähnt, dem Quadrat der Stromstärke proportional ist, und welche wir die primäre oder Joule'sche Wärmewirkung nennen und mit b bezeichnen wollen. Ausser dieser primären Wärme tritt aber an der Löthstelle, in welcher die heterogenen Metalle zusammenstossen, noch der secundäre Peltier'sche Effect auf, den wir mit a bezeichnen wollen und welcher je nach der Richtung des Stromes positiv oder negativ ist. Die an der Löthstelle auftretenden Aenderungen des Wärmezustandes sind also, je nach der Richtung des primären Stromes, entweder

$$i = b + a$$

oder

$$i' = b - a.$$

Aus diesen beiden Gleichungen aber folgt

$$b = \frac{i + i'}{2}$$

und

$$a = \frac{i - i'}{2}.$$

Aus den beobachteten Werthen von i und i' lassen sich also die entsprechenden Werthe von a und b berechnen, und so ergeben sich die Werthe von a und b, wie sie in der vierten und fünften Verticalreihe der obigen Tabelle eingetragen sind. Dividirt man irgend einen der Werthe von a durch den ihm entsprechenden Werth von J, so ergiebt sich der Werth des Quotienten $a : J$, wie er in der sechsten Verticalreihe eingetragen ist. Dieser Quotient behält aber, wie man aus der Tabelle ersieht, stets sehr nahe denselben Werth; die Wärmeänderung a, welche lediglich von der Einwirkung des primären Stromes auf die Löthstelle abhängt, ist also einfach der Stärke dieses Stromes proportional.

Nach diesen Erörterungen ist also, wenn B und A irgend welche constante Factoren bezeichnen:

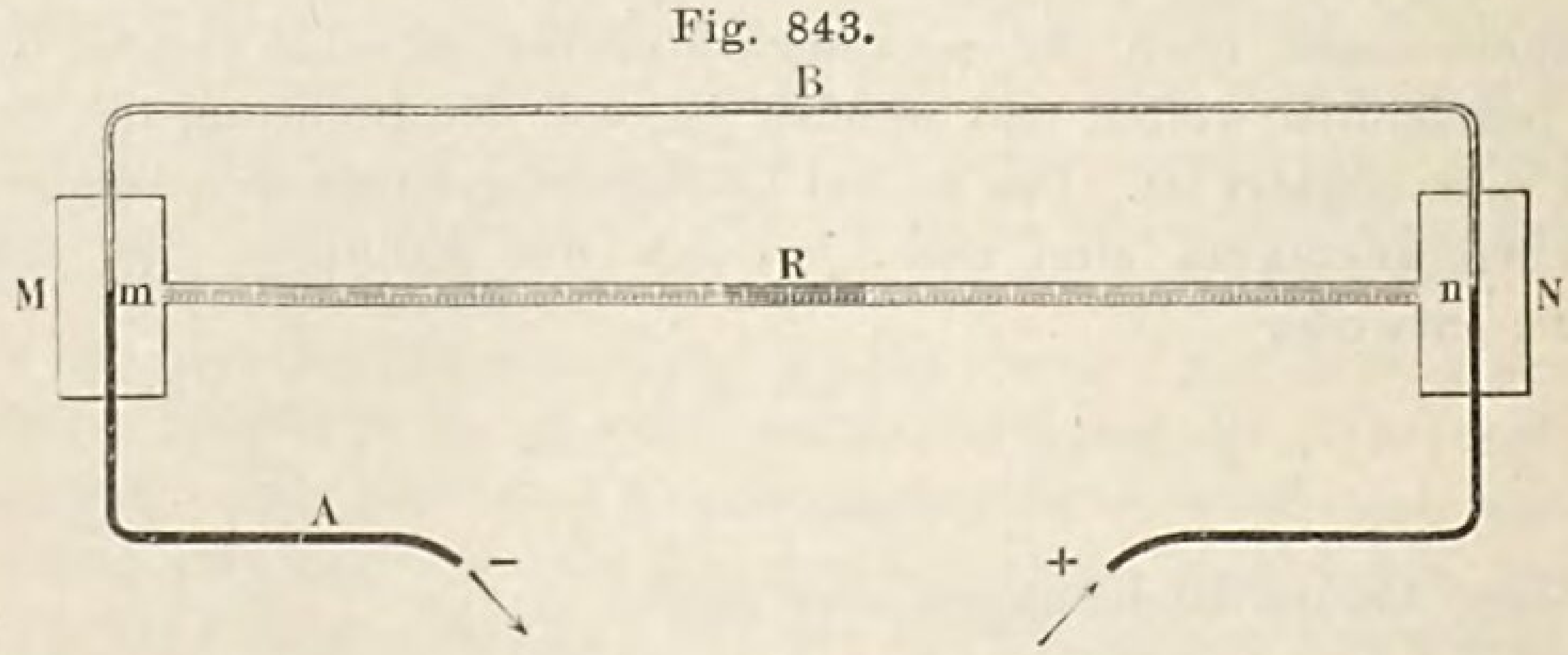
$$b = BJ^2$$
$$a = AJ,$$

folglich: $$i' = BJ^2 - AJ.$$

Wenn J von 0 an allmälig wächst, so ist i' anfangs schwach negativ, d. h. unter den entsprechenden Umständen zeigt sich an der Löthstelle eine schwache Erkaltung; diese Erkaltung nimmt zu, wenn J wächst, um ein Maximum zu erreichen, wenn $J = \frac{A}{2B}$. Wächst J noch mehr, so nimmt i' wieder ab, um für $J = \frac{A}{B}$ gleich Null zu werden. Wächst J über diesen Werth hinaus, so wird i' positiv, es tritt als keine Erkaltung der Löthstelle mehr ein. Dadurch erklärt sich nun auch, warum man nur schwächere Ströme in Anwendung bringen darf, wenn wirklich eine Erkaltung der Löthstelle stattfinden soll.

Edlund ist zu demselben Resultate gekommen, dass die Temperaturänderung an den Löthstellen proportional der Stärke des primären

Fig. 843.



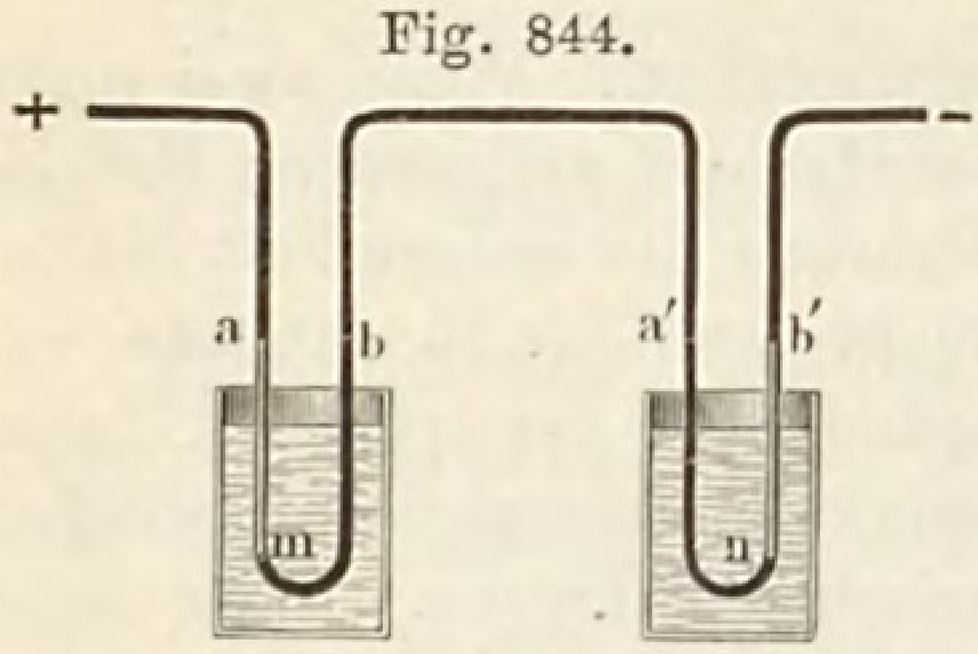
Stromes ist, indem er auf folgende sinnreiche Weise die Peltier'sche Temperaturänderung von der Joule'schen Erwärmung getrennt beobachtete. Er bediente sich dazu eines Differentialluftthermometers von der in Fig. 843 schematisch gezeichneten Anordnung, welche im Wesentlichen mit dem in Fig. 842 abgebildeten und daselbst besprochenen Vorlesungsapparate übereinstimmt. Zwei Luftthermometergefässe M und N sind durch eine kalibrirte Capillarröhre R mit einander verbunden, welche letztere einen Flüssigkeitsfaden enthält, welcher die beiden Luftmassen von einander trennt. Die beiden Metalle A und B durchsetzen luftdicht die Wände der Gefässe und sind bei m und n zusammengelöthet. Bei + und — werden die Pole einer Batterie verbunden.

Sind die Metallstücke innerhalb der Gefässe von gleichem Widerstande und die Gefässe M und N gleich gross, so kann die Joule'sche Erwärmung den Stand des Flüssigkeitsfadens nicht verändern, weil der

Druck der Luft in beiden Gefässen um ein Gleiches gesteigert wird. Hingegen bringt die Peltier'sche Temperaturänderung, da sie in beiden Gefässen entgegengesetzt verläuft, eine Verschiebung des Fadens hervor, aus welcher der Betrag der Temperaturänderungen abgeleitet werden kann. Allfällige Ungleichheiten in den Widerständen bei m und n wurden durch Beobachtungen mit vertauschter Stromrichtung eliminirt.

Endlich hat Le Roux direct durch calorimetrische Messungen die Wärmemengen, welche an den beiden Löthstellen im Ganzen frei wurden, gemessen, indem er diese Löthstellen in kleine mit Wasser gefüllte Calorimeter eintauchte und die gleichzeitigen Temperaturanstiege ermittelte. Man kann sich zur Ausführung dieses Versuches des Apparates zur Bestimmung der specifischen Wärme mittelst des elektrischen Stromes bedienen, den wir in Band II, 2 beschrieben und abgebildet haben, in dem man die Platinspiralen s und s' durch zusammengelöthete Metalldrähte ersetzt, welche dann aber nicht ganz in das Wasser versenkt werden dürfen, sondern so, wie Fig. 844 schematisch zeigt, aus demselben hervorragen müssen. Die Stücke am und $b'n$ sind z. B. aus Wismuth, die übrige Leitung ist aus Kupfer hergestellt.

Fig. 844.



Angenommen, die Wasserwerthe der beiden Calorimeter seien w_1 und w_2, die corrigirten Temperaturanstiege τ_1 und τ_2, so sind die im Ganzen entwickelten Wärmemengen

$$Q_1 = w_1 \tau_1, \qquad Q_2 = w_2 \tau_2.$$

Bezeichnen wir die Joule'schen Wärmen, welche wegen Ungleichheit der Widerstände etwas verschieden sein können, mit q_1 und q_2, die Peltier'schen Wärmequantitäten mit p_1 und p_2, so liefert ein erster Versuch die Gleichungen:

$$Q_1 = q_1 + p_1, \qquad Q_2 = q_2 - p_2.$$

Kehrt man nun den Strom um und lässt ihn genau ebenso stark und ebenso lange durch den Apparat gehen, so erhält man diesmal:

$$Q'_1 = q_1 - p_1, \qquad Q'_2 = q_2 + p_2,$$

woraus folgt:

$$p_1 = \frac{Q_1 - Q'_1}{2}, \qquad p_2 = \frac{Q'_2 - Q_2}{2}.$$

Da aber $p_1 = p_2$ sein soll, so erhält man den Mittelwerth

$$p = \frac{Q_1 - Q'_1 + Q'_2 - Q_2}{4}.$$

Le Roux fand, dass die Wärmemenge p bei verschiedenen Combinationen der thermo-elektrischen Kraft derselben proportional sei. Ausser-

dem untersuchte Le Roux den Einfluss der Temperatur der Löthstelle auf die Grösse von p und fand für die Combination Kupfer-Wismuth die Werthe von p bei 25⁰ und bei 100⁰ im Verhältnisse von 1 : 1,29 stehend. Die Peltier'sche Wärme (sowohl die Erwärmung der einen als die Abkühlung der anderen Löthstelle) wird also grösser, wenn die Temperatur der Löthstelle höher ist.

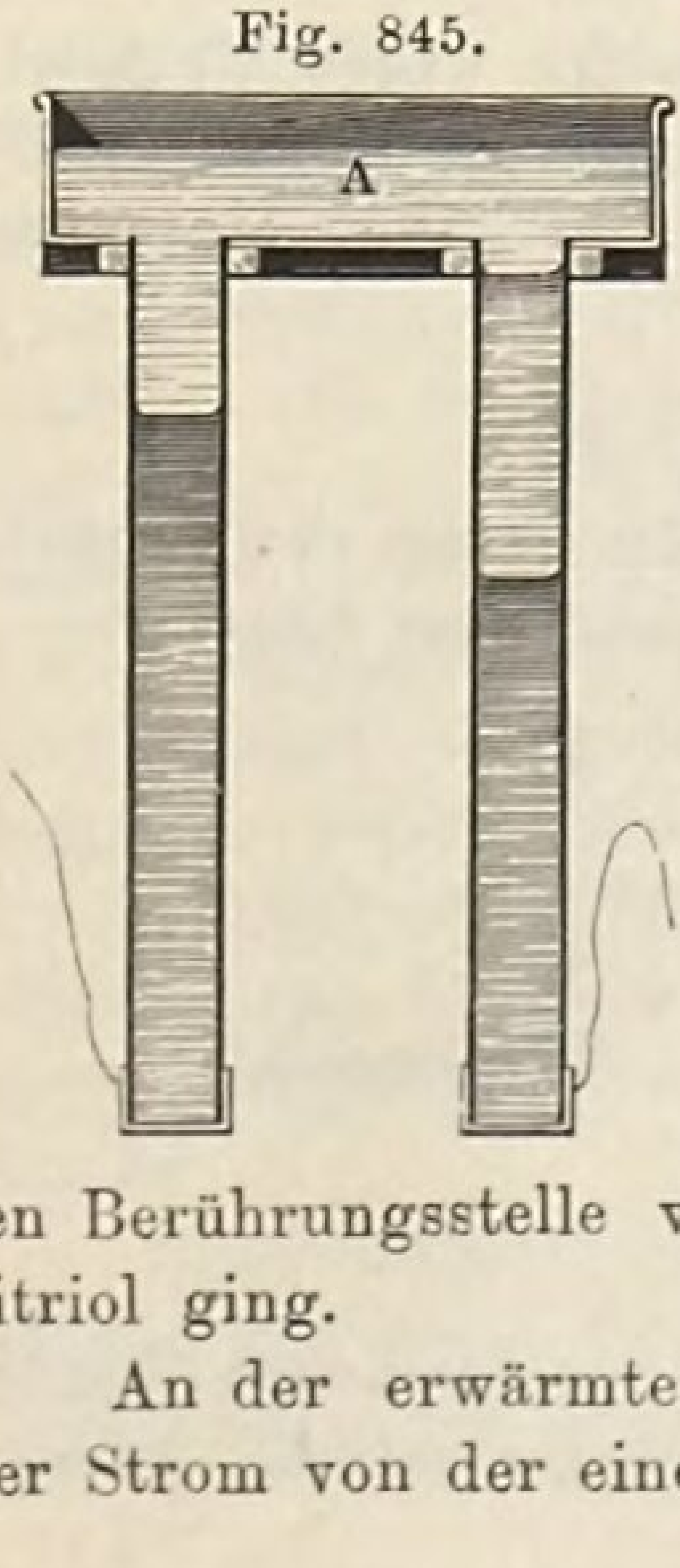
Es ist selbstverständlich, dass zur Hervorbringung des Peltier'schen Phänomens nicht gerade ein Strom eines Hydroelementes erforderlich ist, sondern dass jeder elektrische Strom irgend welcher Quelle, also auch ein Thermostrom, dieselbe Wirkung hervorbringt.

Wir kommen auf die Theorie des Peltier'schen Versuches und auf die Bedeutung der obigen Constanten A und B weiter unten zurück.

253 **Thermoströme zwischen Flüssigkeiten.** Wenn zwei sonst gleichartige mit den Enden des Multiplicatordrahtes verbundene Metallplatten, von denen die eine erwärmt ist, während die andere kalt bleibt, in eine stromleitende Flüssigkeit eingetaucht werden, so entsteht ein Strom, der aber wohl mehr der Oberflächenänderung der erhitzten Platte und ihrer veränderten Affinität zur Flüssigkeit zugeschrieben werden muss, als einer eigentlichen thermo-elektrischen Differenz. Weit mehr dürfte dies bei denjenigen Strömen der Fall sein, welche entstehen, wenn die Berührungsstelle heterogener Flüssigkeiten erwärmt wird.

Die Thermoströme zwischen Flüssigkeiten hat schon Nobili nachgewiesen. Wild benutzte zu ihrer Untersuchung den in Fig. 845 dargestellten Apparat. In den Boden eines Holzkästchens A waren zwei Glasröhren eingesetzt, die unten durch gleichartige Metallkapseln geschlossen waren; jede dieser Metallkapseln war durch einen Kupferdraht mit dem einen Drahtende eines empfindlichen Multiplicators verbunden. Als bei einem hierher gehörigen Versuch die beiden Metallkapseln aus Zink bestanden, war der untere Theil derselben mit einer Lösung von Zinkvitriol gefüllt und darauf eine Lösung von schwefelsaurer Magnesia gegossen worden. An der Berührungsstelle der beiden Flüssigkeiten wurde nun die eine Glasröhre mit einer Blechkapsel umgeben und durch dieselbe Wasserdampf geleitet, um hier eine Temperaturerhöhung zu bewirken. Dabei erfolgte in der That ein Ausschlag der Galvanometernadel, welcher einen Strom anzeigte, der an der erwärmten Berührungsstelle von der schwefelsauren Magnesia zu dem Zinkvitriol ging.

Fig. 845.



An der erwärmten Berührungsstelle der folgenden Lösungen ging der Strom von der einen zur anderen in der Richtung des kleinen Pfeils

der folgenden Tabelle, und zwar hatte die elektromotorische Kraft den in der letzten Verticalreihe rechts angegebenen Werth, wenn die elektromotorische Kraft eines Kupfer-Neusilberelementes für die gleiche Temperaturdifferenz gleich 1 gesetzt wird.

Kupfervitriol (1,1)	←	schwefelsaures Kali . .	(1,07) . .	5,7
Kupfervitriol (1,1)	←	schwefelsaure Magnesia .	(1,05) . .	4,2
Kupfervitriol (1,1)	←	Zinkvitriol	(1,09) . .	3,6
Kupfervitriol (1,1)	←	Eisenvitriol	(1,07) . .	2,6
Kupfervitriol (1,1)	←	Eisenvitriol	(1,09) . .	1,9
Kupfervitriol (1,1)	←	Zinkvitriol	(1,2) . .	1,5

Die eingeklammerten Zahlen geben das specifische Gewicht der entsprechenden Lösungen an.

Eine concentrirte und eine verdünnte Lösung desselben Salzes giebt bei der Erwärmung der Contactstelle einen schwachen Strom, der hier von der verdünnten zur concentrirten Lösung geht.

Thermo-elektrisches Verhalten der Flamme. Mehrere 254
Physiker, wie Becquerel, Buff u. A., haben nachgewiesen, dass die Gase der Flamme im Stande sind, den elektrischen Strom zu leiten. Es lässt sich dies am einfachsten zeigen, wenn man die beiden Poldrähte einer Säule, in deren Schliessungsbogen ein Multiplicator eingeschaltet ist, von entgegengesetzter Seite her in gleicher Höhe in die Flamme einsenkt, aber so, dass sie nicht in Berührung kommen. Es erfolgt eine je nach den Umständen grössere oder geringere Ablenkung der Multiplicatornadel. Das Maximum der Leitungsfähigkeit zeigt die Flamme etwas unter ihrer Spitze, aber selbst noch etwas über der Spitze sind die von der Flamme aufsteigenden warmen Gase leitend.

Werden zwei Platindrähte, die mit den Drahtenden eines Multiplicators leitend verbunden sind, ohne dass sich eine Säule im Schliessungsbogen befindet, von entgegengesetzter Seite her, in gleicher Höhe, gleich tief in die Flamme eingetaucht, so zeigt sich kein Strom, so lange die beiden Platindrähte gleich warm sind; ist aber der eine Platindraht heisser als der andere, wie es z. B. der Fall sein wird, wenn man auf der einen Seite einen dünnen, auf der anderen Seite aber einen dickeren Platindraht in die Flamme hält, so zeigt der Multiplicator sogleich einen Strom an, der offenbar nur ein thermo-elektrischer Strom sein kann. Die erhitzte Gasschicht, welche sich hier zwischen den ungleich heissen Drahtstücken befindet, verhält sich offenbar gerade so, wie ein aus einem Metall *a* gebildeter Stab, an dessen beide Enden Drähte eines anderen Metalles *b* angelöthet sind.

Auf dieses Verhalten erhitzter Gase führt nun Wild*) die unipolare Erwärmung der positiven Kohlenspitze beim galvanischen

*) Pogg. Ann. CXI.

Flammenbogen zurück, wie wir bereits S. 527 bemerkt haben. Wenn sich die erhitzten Gase zwischen den Kohlenspitzen wie metallische Leiter verhalten und wenn sie ausserdem noch eine extreme Stellung in thermo-elektrischer Beziehung einnehmen, so muss in Folge der in §. 252 besprochenen Peltier'schen Wirkung des hydro-elektrischen Stromes an der einen Kohlenelektrode eine Erhöhung, an der anderen eine Erniedrigung der Temperatur unter diejenige stattfinden, welche in Folge der primären Wirkung des Stromes allein hier auftreten würde.

Wenn diese Ansicht richtig ist, so muss ein thermo-elektrischer Strom entstehen, wenn man nach Unterbrechung des Hydrostromes, welcher den Flammenbogen erzeugte, rasch die positive Polspitze mit dem einen, die negative aber mit dem anderen Drahtende eines Galvanometers verbindet, und zwar muss dieser Strom die Luftschicht zwischen den Kohlenspitzen in entgegengesetzter Richtung durchlaufen, wie der ursprüngliche Hydrostrom. Als Wild diesen Versuch mit einem Spiegelgalvanometer anstellte, zeigte sich nicht allein dieser Thermostrom, sondern er war auch stark genug, um einen über die Grenze der Scala hinausgehenden Ausschlag zu bewirken, dessen Richtung in der That einen positiven Strom andeutete, welcher von der kälteren Kohlenspitze durch die Luftschicht zur wärmeren überging.

255 **Theorie der Thermo-Elektricität.** Die Ansichten über die Ursache der thermo-elektrischen Erscheinungen sind noch durchaus nicht geklärt, weshalb wir ihrer Erörterung nur einen beschränkten Raum gewähren können.

Schon im §. 247 haben wir die Grundzüge jener älteren, aber heute noch verbreiteten Theorie mitgetheilt, welche in der Thermo-Elektricität nur eine Verallgemeinerung der Contactelektricität erblickt. Nach dieser Theorie wird angenommen, dass die Höhe des Potentials zu beiden Seiten der Contactstelle (Löthstelle) eines Thermo-Elementes AB, sowie die Differenz dieser Potentialhöhen von der Höhe der Temperatur an den Contactstellen abhängen. Demnach wären also die Werthe der Potentialdifferenz an den beiden Contactstellen beispielsweise gegeben durch $V_b - V_a = v$ und $V'_b - V'_a = v'$. Die elektromotorische Kraft des Thermo-Elementes ist dann:

$$E = v' - v.$$

Setzt man nun

$$v = \alpha + \beta T + \gamma T^2$$
$$v' = \alpha + \beta T' + \gamma T'^2,$$

so folgt, wie bereits im §. 247 entwickelt wurde, die Gleichung

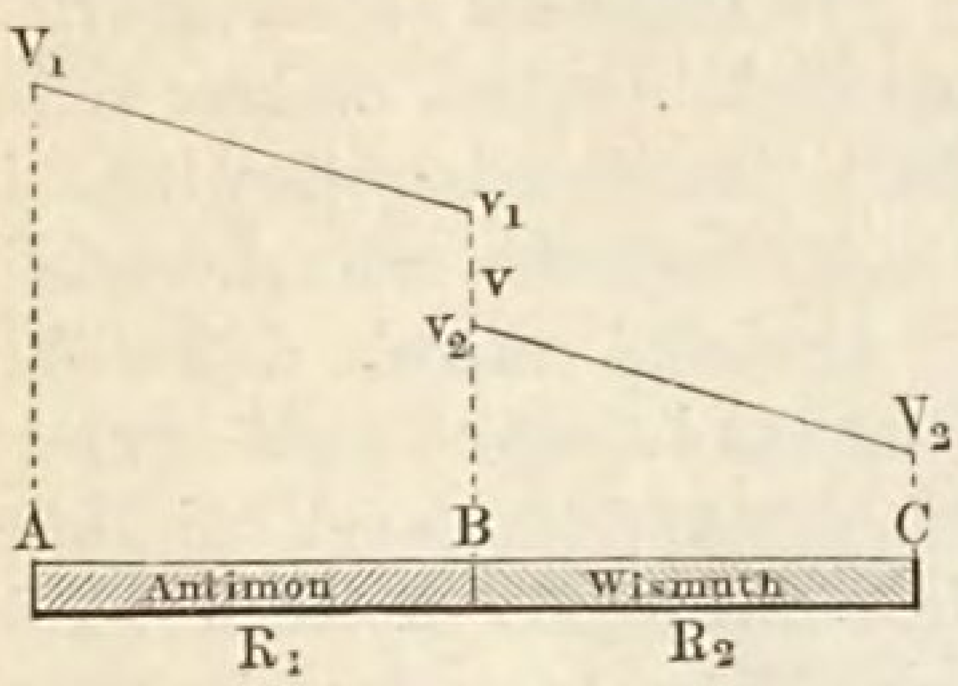
$$E = (T' - T)\left(\beta + 2\gamma \frac{T' + T}{2}\right),$$

welche mit den Erscheinungen im Einklange steht.

Die Erklärung des Peltier'schen Effects ist dann folgende:

Es seien AB und BC, Fig. 846, zwei verschiedene Leiter von constantem Querschnitt, welche bei B zusammengelöthet sind und an den Enden A und C auf den Potentialhöhen V_1 und V_2 entsprechend den Ordinaten AV_1 und CV_2 erhalten werden. Sind die Widerstände der beiden Leiter R_1 und R_2 durch die Abscissenstrecken AB und BC dargestellt, und die der Temperatur bei B entsprechende elektromotorische Kraft durch die Höhe $v_1 v_2 = v$, so entspricht die gebrochene Gerade $V_1 v_1 v_2 V_2$ dem Verlauf des Potentials zwischen A und C. Nach dem Ohm'schen Gesetze gilt also für die Stromstärke:

Fig. 846.



$$J = \frac{V_1 - v_1}{R_1} = \frac{v_2 - V_2}{R_2} = \frac{V_1 - V_2 - (v_1 - v_2)}{R_1 + R_2} = \frac{V - v}{R} \quad . \quad . \quad 1)$$

wobei V die den Strom hervorbringende Potentialdifferenz $V_1 - V_2$ und R den Gesammtwiderstand zwischen den Punkten A und C bedeuten.

Die gesammte Stromenergie E, die zwischen A und C (in der Zeiteinheit) zur Entwickelung kommt, ist:

$$E = J(V_1 - V_2) = JV,$$

woraus, wenn wir V durch den Werth $JR + v$ ersetzen, der sich aus 1) ergiebt:

$$E = J(JR + v) = J^2 R + Jv.$$

Diese Energie besteht aus zwei Theilen. Der eine Theil, $J^2 R$, ist dem Quadrat der Stromstärke und dem Widerstande proportional. Es ist die Joule'sche Wärme, welche längs des ganzen Leiters im Verhältniss seines Widerstandes frei wird und welche positiv bleibt, wenn auch J das Zeichen (die Richtung) wechselt. Der andere Theil, Jv, welcher der ersten Potenz der Stromstärke und dem Potentialabfalle v proportional ist, entspricht dem Peltier'schen Effect; derselbe wechselt das Zeichen mit der Stromrichtung, er ist positiv (Wärme), wenn der Strom in der Richtung des abfallenden Potentials bei B gerichtet ist, negativ (Kälte), wenn er dem Absturze des Potentials entgegen zu fliessen genöthigt wird. So erklärt sich die erwärmende Wirkung des Stromes an der einen (kälteren), die abkühlende Wirkung an der anderen (wärmeren) Löthstelle.

Das Thermo-Element kann demnach, wie R. Clausius gezeigt hat, als eine thermodynamische Maschine betrachtet werden, welche Arbeit in Form eines elektrischen Stromes leistet. An der einen Löthstelle wird bei der Temperatur T' in der Zeiteinheit eine Wärmemenge Jv' zugeführt und dazu verbraucht, um die Arbeit zu leisten, die in der

Hebung der Elektricitätsmenge J auf die Potentialstufe v' besteht; an der anderen Löthstelle muss, wenn der Strom constant fortdauern soll, die niedrigere Temperatur T erhalten werden, was durch Wegführung der Wärmemenge Jv geschieht, welche durch das Sinken der Elektricität J um die Potentialstufe v frei wird. Die Differenz dieser Wärmemengen $J(v'-v)$ ist in Stromarbeit verwandelt worden, welche selbst wiederum, wenn nicht etwa andere Arbeit damit geleistet wird, in Form von Joule'scher Wärme im ganzen Stromkreise zum Vorschein kommt. Aus obiger Ueberlegung ersieht man, dass die Peltier'sche Wirkung stets dem Potentialsprunge v resp. v' proportional sein muss; ferner ersieht man, dass auch bei dieser thermodynamischen Maschine derselbe Grundsatz gilt, welchen wir in Bd. II, 2 kennen lernten, dass, wenn ein Wärmequantum in Arbeit verwandelt werden soll, ein anderes Wärmequantum von einem wärmeren in einen kälteren Körper übergehen muss.

Aus den Ableitungen an jener Stelle geht aber auch hervor, dass, wenn in einer vollkommenen thermodynamischen Maschine bei der absoluten Temperatur T' die Wärme Q' zugeführt, bei T die Wärme Q abgeführt und die Differenz $Q'-Q$ in Arbeit verwandelt wird, dass dann

$$Q : Q' = T : T'.$$

Hieraus folgt also auch, da beim Thermo-Element $Q = AJv$, $Q' = AJv'$ *):

$$v : v' = T : T',$$

also die elektromotorische Kraft

$$E = v' - v \text{ proportional } T' - T,$$

mithin müsste auch die Stromstärke der Differenz der Temperaturen der Löthstellen proportional sein.

Diese Consequenz der Proportionalität der thermoelektromotorischen Kraft mit der Temperaturdifferenz der Löthstellen hat sich nun nicht bestätigt, indem die elektromotorische Kraft mit steigender Temperatur der heisseren Löthstelle (die andere Löthstelle auf constanter Temperatur erhalten gedacht) ein Maximum erreicht, dann wieder abnimmt und bei fortgesetzter Temperatursteigerung der heisseren Stelle sogar entgegengesetzt werden kann (§. 246). Da wir früher gesehen haben, dass die Peltier'sche Wirkung dem Potentialsprung proportional ist, so müsste hiernach auch für die Temperatur des Maximums der elektromotorischen Kraft die Peltier'sche Wirkung verschwinden **), für

*) A = calorisches Arbeitsäquivalent.

**) Die experimentellen Resultate sind hier durchaus nicht in Uebereinstimmung. Während aus Le Roux' Beobachtungen, wie §. 252 mitgetheilt wurde, bei mässig hohen Temperaturen für die Combination Wismuth-Kupfer die Proportionalität der Peltier'schen Wirkung mit der absoluten Temperatur hervorzugehen scheint, haben neuere Versuche von Budde ergeben, dass für

diese Temperatur würde daher an der heisseren Löthstelle keine Wärme aufgenommen, an der kälteren dagegen fortwährend Wärme entwickelt und ausserdem Stromarbeit geleistet werden. Diese und andere damit zusammenhängende Widersprüche mit den beiden Hauptsätzen der mechanischen Wärmetheorie veranlassten R. Clausius und W. Thomson eine andere Theorie der Thermoströme aufzustellen, welche von Budde noch weiter entwickelt wurde. Diese Theorie nimmt an, dass nicht bloss an den Contactstellen durch die Berührung der verschiedenen Metalle, sondern ausserdem in jedem der einzelnen Metallstücke zwischen den Stellen verschieden hoher Temperatur, und zwar (nach Clausius und Budde) in Folge der materiellen Verschiedenheit, welche durch die ungleiche Höhe der Temperatur hervorgerufen wird, Potentialdifferenzen entstehen. Wären diese Potentialdifferenzen bei allen Metallen gleich gross und nur von dem Temperaturgefälle abhängig, so könnten daraus keine Ströme entstehen, da sich die entgegengesetzten gleich hohen Potentialdifferenzen in der Stromwirkung compensiren müssten, sowie ja auch in einem homogenen Leiter deshalb keine Ströme entstehen könnten. Man muss daher annehmen, dass die durch gleiche Temperaturdifferenzen bei verschiedenen Metallen hervorgerufenen Potentialdifferenzen verschieden gross seien. Bezeichnen wir die Potentialdifferenz, welche durch die Temperaturdifferenz $= 1$ in einem Metalle hervorgerufen wird, mit σ, so gilt, wenn in demselben Metalle der Temperaturdifferenz τ die Potentialdifferenz v entspricht:

$$v = \sigma\tau.$$

Geht nun ein Strom durch dieses Metall, so muss, wie bei jeder Potentialdifferenz, auch hier eine Wärmewirkung eintreten, welche dem Peltiereffect analog ist und Thomsoneffect genannt wird. Hat dieser Strom die Intensität i, so ist $iv = i\sigma\tau$ die (positive oder negative) Wärmemenge, welche (abgesehen von der Joule'schen Wärme) durch den Thomsoneffect entsteht.

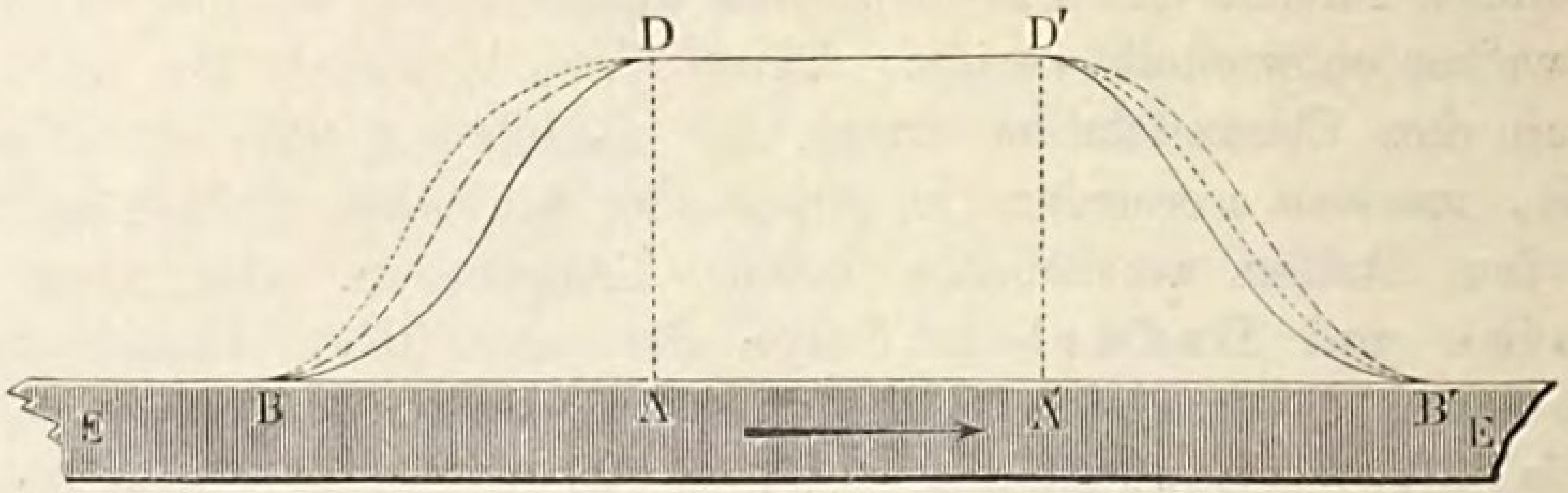
Es bedeutet dann σ die Wärmemenge, welche ein Strom von der Stärke 1 in einem Leiterstücke, welches an den Enden eine Temperaturdifferenz $= 1$ besitzt, entwickelt oder absorbirt. Die Grösse σ ist also eine für jedes Metall charakteristische Constante, welche nach W. Thomson die specifische Elektricitätswärme genannt wird.

Dass eine solche, dem Peltier'schen Effecte analoge, mit der Umkehrung des Stromes ebenfalls umkehrende und der Stromstärke proportionale Wärmewirkung wirklich stattfindet, hat W. Thomson nachgewiesen. Denken wir uns, ein metallener Leiter, z. B. ein Stück

Kupfer-Eisen in der That die Peltier'sche Wärme für die Temperatur des Maximums der elektromotorischen Kraft verschwindet. Dies scheint auch durch die Versuche von Naccari und Bellati bestätigt zu werden. (Le Roux 1867; Budde, Pogg. Ann. **153**, S. 360 (1874); Naccari-Bellati 1878, Wiedem. Beibl. II, S. 223; Wiedem. Elektricität II, S. 450.)

Eisen EE', Fig. 847, werde künstlich innerhalb der Grenzen A und A' auf einer constanten höheren Temperatur, ausserhalb der Grenzen BB' auf einer constanten niedrigeren Temperatur erhalten Der Verlauf der Temperatur sei durch die ganz ausgezogene Curve $BDD'B'$ angedeutet.

Fig. 847.



Schicken wir jetzt einen Strom durch das Eisen, so bringt er zwei Wirkungen hervor. Die erste Wirkung ist die Joule'sche Wärmewirkung, welche jedenfalls positiv, dem Quadrat der Stromstärke und dem Widerstande proportional ist. Hat das Eisen überall gleichen Querschnitt, so sind die dadurch hervorgebrachten Temperaturerhöhungen zwischen B und A ganz symmetrisch zu jenen zwischen B' und A'. Die dadurch hervorgebrachte Temperaturanordnung sei durch die gestrichelte Curve dargestellt. Eine Umkehrung des Stromes ändert an dieser Anordnung nichts, denn das Quadrat der Stromstärke bleibt immer positiv.

Die zweite Wirkung des Stromes entspricht dem Thomsoneffect, sie stammt von den Potentialdifferenzen, welche zwischen B und A und zwischen A' und B' in Folge des Temperaturgefälles auftreten. Diese Wirkung ist proportional der Stromstärke und der Potentialdifferenz. Sie ist daher zwischen B und A einerseits und zwischen A' und B' andererseits entgegengesetzten Zeichens und ändert diese Zeichen bei Umkehrung des Stromes. Geht der Strom von links nach rechts, wie der Pfeil, so nimmt die Temperatur zwischen B und A zu, zwischen A' und B' ab, so dass eine Anordnung entsteht, welche der punktirten Curve entspricht. Die Temperaturcurve ändert sich also in der Weise, als ob ein Wärmetransport in einer dem Strome entgegengesetzten Richtung stattgefunden hätte. Beim Kupfer ist die Wirkung, wie Thomson gezeigt, umgekehrt, und schwächer als beim Eisen. Le Roux hat die Proportionalität der Wirkung mit der Stromstärke bei vielen Metallen nachgewiesen und gezeigt, dass die Wirkung für Blei = Null ist.

Die Clausius-Thomson-Budde'sche Theorie, bezüglich deren eingehenderen Studiums wir auf die Originalarbeiten verweisen müssen, ist bisher mit den bekannten Thatsachen in Einklang stehend. Doch hat L. Boltzmann in einer umfangreichen Abhandlung*) gezeigt, dass sie nicht als nothwendige Consequenz aus der mechanischen Wärmelehre

*) Wien. Akad. Ber. 96, 2, S. 1258 (1887).

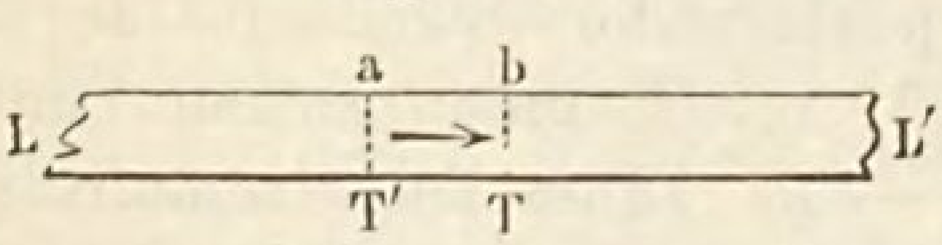
folge, dass vielmehr auch noch andere Theorien möglich seien, wenn man voraussetzt, dass bei dem Thermo-Element die Elektricitätsbewegung von einer Wärmebewegung durch Leitung untrennbar ist und daher wegen der Nichtumkehrbarkeit der letzteren Erscheinung bei Thermo-Elementen umkehrbare Kreisprocesse überhaupt nicht denkbar sind. Die oben erwähnten Theorien beruhen aber auf der Voraussetzung der Umkehrbarkeit der thermoelektrischen Processe.

Eine solche Theorie, bei welcher die Untrennbarkeit der Wärmeleitung und der thermoelektrischen Ströme besonders horvortritt, wurde schon 1874 von Fr. Kohlrausch*) veröffentlicht. Dieselbe beruht auf der Hypothese, dass mit jedem Wärmestrome in bestimmtem, von der Natur des Leiters abhängigem Maasse ein elektrischer Strom verbunden sei, wozu dann zur Erklärung des Peltier'schen Phänomens noch die Zusatzhypothese zu setzen ist, dass durch den elektrischen Strom die Wärme bewegt werde.

Mit Zugrundelegung dieser Hypothesen, deren Annahme keine wesentlichen Hindernisse im Wege stehen, lassen sich nun die thermoelektrischen Erscheinungen, ungefähr wie folgt, erklären:

Es sei LL', Fig. 848, ein Stück Leiter, bei a und b im Abstande δ je ein Querschnitt vom Flächeninhalte q, die Temperaturen daselbst seien T' und T, wobei $T' > T$, es sei c das elektrische, k das thermische Leitungsvermögen des Körpers, r der Leitungswiderstand des Stückes zwischen a und b. In Folge der Temperaturdifferenz $T' - T$ fliesst per Zeiteinheit eine Wärmemenge W von a nach b, diese Wärmebewegung rufe eine gleichzeitige Bewegung einer proportionalen Menge J von (positiver oder negativer) Elektricität hervor. Es ist also die Stromstärke

Fig. 848.



$$J = \alpha W,$$

wo α eine Constante ist, die von der Natur des Leiters abhängt.

Der Widerstand r von a bis b ist ausgedrückt durch

$$r = \frac{\delta}{qc},$$

die Potentialdifferenz für die beiden Querschnitte a und b, d. i. die elektromotorische Kraft des Stromes J, ist daher

$$\varepsilon = Jr = \frac{\alpha \delta W}{qc}.$$

Andererseits ist die Wärmemenge W nach den Gesetzen der Wärmeleitung

$$W = \frac{kq(T' - T)}{\delta},$$

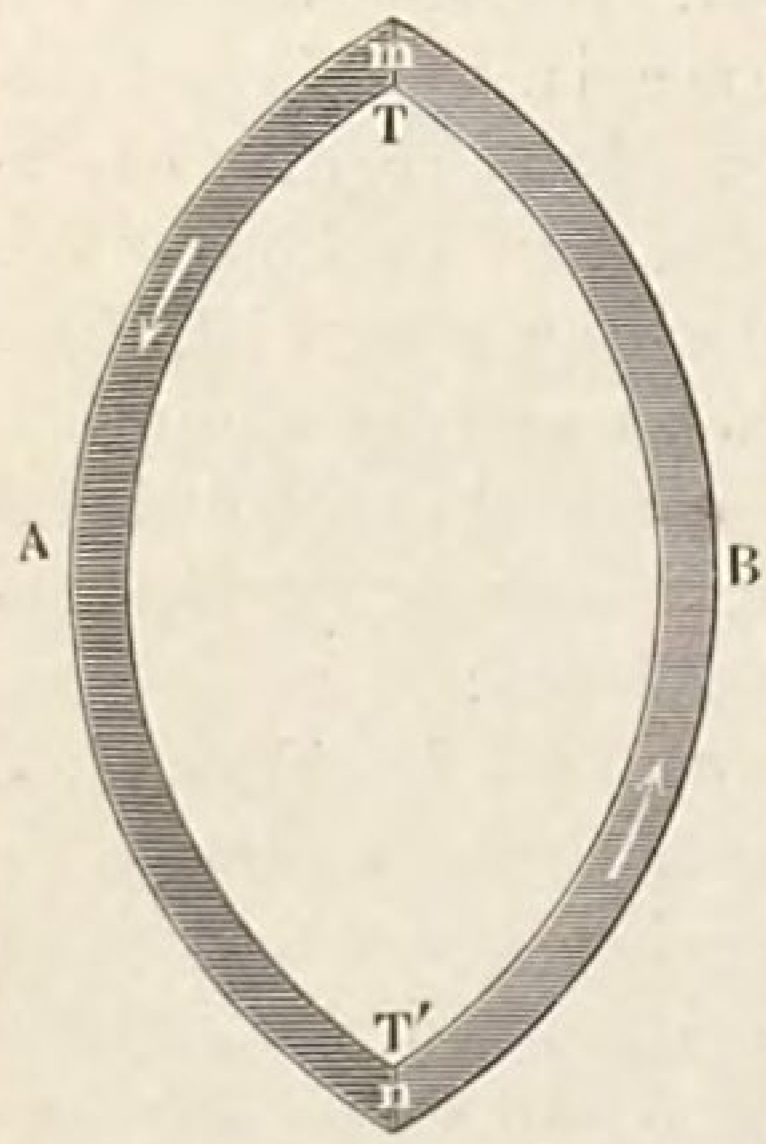
*) Pogg. Ann. CLVI, 8, 601 (1875); Göttinger Nachr. 1874.

mithin

$$\varepsilon = \frac{\alpha \delta}{q c} \cdot \frac{k q (T' - T)}{\delta} = \frac{\alpha k}{c} (T' - T) = \vartheta (T' - T),$$

wenn wir den Factor $\frac{\alpha k}{c}$ mit ϑ bezeichnen und die thermoelektrische Constante des Körpers nennen, welche eine analoge Bedeutung hat, wie die Grösse σ in der Theorie von Thomson und Budde. Daraus folgt also, ebenso wie nach des Letzteren Theorie, dass in jedem Leiter, der an zwei Stellen eine ungleiche Temperatur besitzt, eine dieser Temperaturdifferenz proportionale Potentialdifferenz auftreten muss. Ein dauernder Strom kann jedoch nicht daraus entstehen, da die Elektricitätsbewegung aufhören muss, sobald diese Potentialdifferenz erreicht ist. Von einem Leiter zum anderen ist dagegen diese Wirkung verschieden gross, weil von der Constante ϑ des Leiters abhängig. Jetzt denken wir uns zwei Leiter A und B, Fig. 849, zu einem Thermo-Element verbunden. Bei m und n seien wieder die Temperaturen T und T', ϑ_a und ϑ_b seien die zugehörigen Constanten, und es sei $\vartheta_b > \vartheta_a$. In beiden Leitern strömt die Wärme von T' nach T. Dabei weckt dieser Wärmestrom in A einen elektrischen Strom mit der elektromotorischen Kraft $\varepsilon_a = \vartheta_a (T' - T)$, in B einen solchen mit der elektromotorischen Kraft $\varepsilon_b = \vartheta_b (T' - T)$. Diese elektromotorischen Kräfte subtrahiren sich im ganzen Kreise und es erübrigt daher die resultirende elektromotorische Kraft

Fig. 849.



$$\varepsilon = (\vartheta_b - \vartheta_a)(T' - T),$$

dieselbe ist von der erwärmten Löthstelle gegen den Leiter mit der grösseren thermoelektrischen Constante gerichtet.

Um zu erklären, dass die elektromotorische Kraft nicht genau der Temperaturdifferenz proportional ist und von der absoluten Höhe der Mitteltemperatur abhängt, ist nur nöthig anzunehmen, dass der Werth von ϑ wie so viele andere physikalische Eigenschaften mit der Temperatur sich ändere. F. Kohlrausch hat an der citirten Stelle dann auch gezeigt, wie sich das Peltier'sche Phänomen mit Hülfe der zweiten oben angeführten Hypothese erkläre, und dass seine Theorie mit dem Princip der Erhaltung der Energie im Einklange stehe.

A. v. Waltenhofen hat dann später*) theoretische Einwände gegen die frühere, und experimentelle Belege zu Gunsten der neuen Theorie veröffentlicht, welche wir hier wegen Raummangel nicht näher besprechen

*) Wien. Akad. Ber. 75, 245, 1877

können. Wir müssen vielmehr auf die eingehende Behandlung, welche L. Boltzmann diesem schwierigen Gegenstande in der oben citirten Abhandlung widmete, verweisen.

Dagegen wollen wir hier noch auf einen Umstand hinweisen, der für die Frage über die Existenz einer Contactelektricität überhaupt, oder doch über die wahre Grösse der durch den Contact hervorgerufenen elektromotorischen Kräfte von hohem Interesse ist.

Es wurde oben gezeigt, dass jede Potentialdifferenz in einem Stromleiter Anlass zu einem positiven oder negativen Wärmeeffect giebt, wenn ein Strom in der einen oder der anderen Richtung hindurchgeht. Daraus folgt, dass umgekehrt die Existenz einer Potentialdifferenz sich durch einen Wärmeeffect verrathen müsse, welcher die Eigenschaft hat, das Zeichen zu wechseln, sobald die Stromrichtung gewechselt wird. Da die absolute Grösse der auf diese Weise in der Zeiteinheit gelieferten oder absorbirten Energie, nach absolutem mechanischem Maasse gemessen, durch den Ausdruck $A = JV$ gegeben ist, so lässt die Gleichung $V = \frac{A}{J}$ umgekehrt die Grösse der Potentialdifferenz bestimmen, welche an einer Löthstelle oder Berührungsstelle zweier Metalle vorhanden ist. Die gleichzeitig entwickelte Joule'sche Wärme lässt sich, wie oben gezeigt wurde, durch Beobachtungen mit verkehrter Stromrichtung eliminiren. Offenbar ist diese Methode von zahlreichen Fehlerquellen frei, welche der elektrostatischen Messung der Contactpotentialdifferenzen mittelst Elektrometern anhaften. Die von Edlund und von Le Roux nach dieser Methode erhaltenen Resultate stimmen nun mit den elektrometrisch erhaltenen Werthen ganz und gar nicht überein, sie lassen die Contactpotentialdifferenzen ganz geringfügig erscheinen. Hierdurch erfahren die anderweitigen Nachweise der Contactelektricität eine starke Erschütterung ihrer Beweiskraft und lassen es wahrscheinlich erscheinen, dass bei der letzteren die Einwirkung des umgebenden Mittels die wirksame Ursache ist, wie die Gegner der Contacttheorie längst geltend gemacht haben*).

Thermomagnetischer Effect, galvanomagnetische Temperaturdifferenz; Versuche von A. v. Ettingshausen und Nernst. 256 Lässt man durch eine rechteckige Wismuthplatte der Länge nach einen Wärmestrom fliessen — etwa indem man an die kurzen Seiten der Platte Kupferröhren löthet, durch welche Wasser von verschiedener Temperatur strömt — und verbindet zwei auf einer Isotherme der Platte liegende Punkte a und b durch angelöthete Drähte mit einem Galvanometer G, so erhält man in letzterem keinen galvanischen Strom; stellt man aber die Wismuthplatte in ein magnetisches Feld, so dass die Kraftlinien desselben die Ebene der Platte senkrecht schneiden, so zeigt das

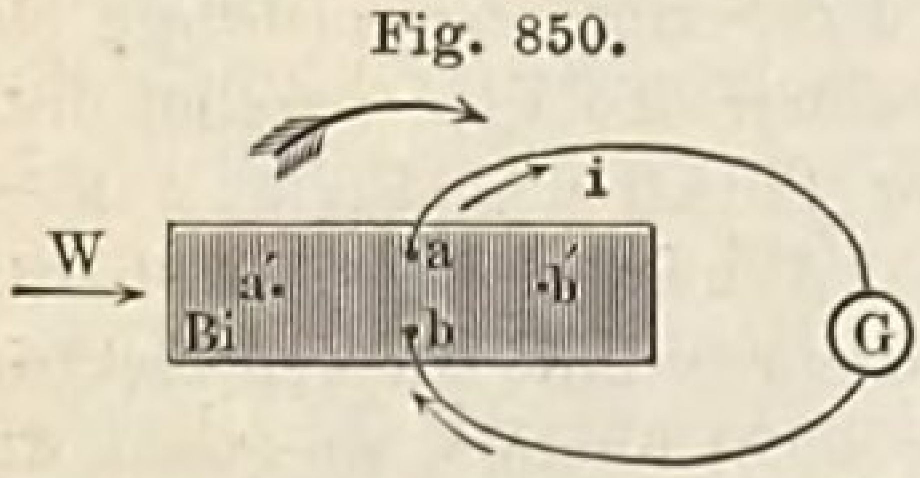
*) Siehe die Anmerkung *) S. 357 und die Gegenbemerkungen von F. Braun in d. Sitzungsber. der Berliner Akad. 1885, S. 291.

Galvanometer einen dauernden Strom an, dessen Richtung sich ändert, sowohl mit der Erregungsweise des magnetischen Feldes, als auch mit der Richtung, welche das Wärmegefälle in der Platte hat.

Diese Erscheinung, welche v. Ettingshausen und Nernst*) zuerst an einer Wismuthplatte beobachteten und „thermomagnetischen Effect" nannten, hat grosse Aehnlichkeit mit dem in §. 242 und 243 beschriebenen Hall'schen Phänomen; der Unterschied besteht jedoch darin, dass hier der primäre galvanische Strom durch einen Wärmestrom ersetzt erscheint. Es lässt sich leicht constatiren, dass der beobachtete Strom nicht etwa thermoelektrischen Ursprungs sei; auch gelingt der Versuch, wenn die Wismuthplatte an einem Ende von einem federnden Kupferbleche getragen wird, welches man erhitzt, das aber vor directer metallischer Berührung mit der Platte durch Glimmer geschützt ist.

Die Richtung des thermomagnetischen Stromes ist bei Wismuth durch die Regel bestimmt, dass man von der Eintrittsstelle des Wärmestromes *W* in die Platte zur Eintrittsstelle des erzeugten Stromes *i* durch eine Bewegung entgegengesetzt dem Sinne der Ampère'schen Ströme des Magnetfeldes gelangt (Fig. 850). In demselben Sinne, aber weit schwächer als im Wismuth, zeigte sich die Erscheinung bei Antimon, Nickel, Kobalt, desgleichen bei Tellur; sehr schwach bei Kupfer, Zink, Silber, Kohle, zweifelhaft bei Blei und Zinn; im entgegengesetzten Sinne trat sie dagegen bei Eisen und Stahl auf.

Fig. 850.



Die in der Platte geweckte transversale, d. h. zum Wärmestrom senkrecht gerichtete, elektromotorische Kraft ist proportional dem Abstande der Elektroden *ab*, nahe proportional der Intensität des Magnetfeldes und dem Wärmegefälle in der Platte, unabhängig dagegen von der Dicke der letzteren; auch ist die mittlere Temperatur der Platte auf die Grösse der Wirkung von Einfluss**).

Ausser dieser transversalen liess sich bei Wismuth auch eine elektromotorische Kraft beobachten, welche in der Richtung des Wärmestromes in der Platte auftritt. Um diese nachzuweisen, werden die zum Galvanometer führenden Elektrodendrähte etwa auf der Längsmittellinie der Platte in a' und b' aufgelöthet; da nun die Elektroden an anisothermen Stellen sich befinden, so wird zunächst der hierdurch in der Galvanometerleitung fliessende thermoelektrische Strom auf passende Weise compensirt (s. §. 242). Bei Erregung des magnetischen Feldes erhält man einen dauernden Strom, dessen Richtung sich nicht ändert, wenn das magnetische Feld in dem einen oder dem anderen Sinne her-

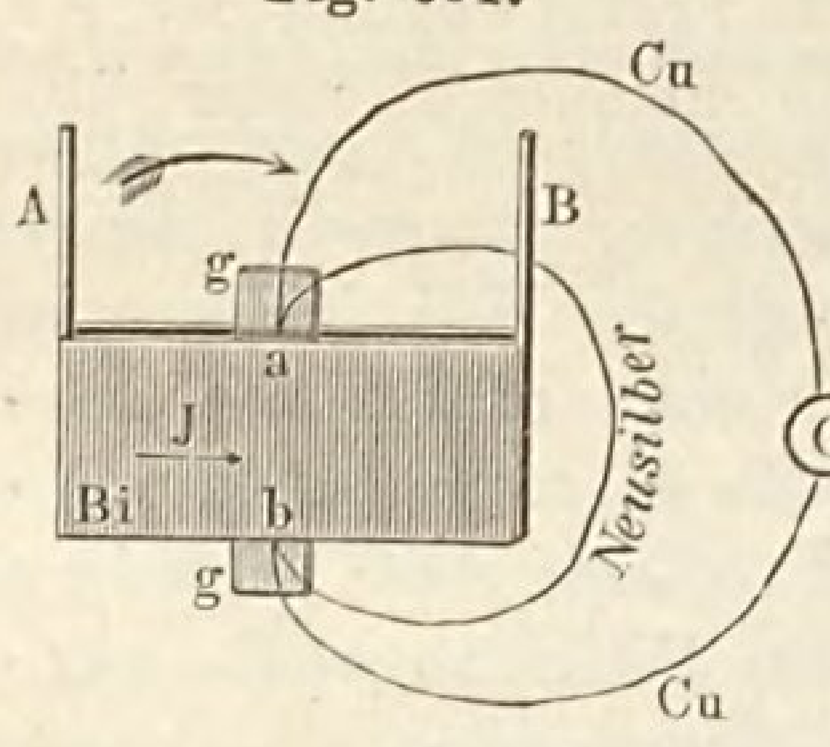
*) Wiener Anz. 1886, Nr. XIII; Wiedem. Ann. XXIX, S. 343.
**) Nernst, Wiedem. Ann. XXXI, S. 760 (1887).

gestellt wird; meist aber ist die Intensität des Stromes nicht in beiden Fällen die gleiche. Die elektromotorische Kraft dieses „longitudinalen Effectes" ist genähert dem Quadrat der Feldintensität proportional und hängt ausserdem nur ab von den Temperaturen der beiden Ableitestellen auf der Platte; ihre Richtung ist verschieden, je nach der mittleren Temperatur, welche die Platte zwischen den Elektroden besitzt, ausserdem scheinen individuelle Verschiedenheiten aufzutreten. So fand sich in sehr reinem Wismuth, dass, wenn die Ableitestellen die Temperaturen 0 und 20° C. hatten, der Strom in der Platte von der wärmeren zur kälteren Stelle floss, also in demselben Sinne, wie der Wärmestrom; für die Temperaturen 60 und 100° an den Ableitestellen war hingegen die Richtung des galvanischen Stromes eine dem Wärmestrome in der Platte entgegengesetzte.

In anderen Substanzen als Wismuth ist der longitudinale thermomagnetische Effect bisher nicht aufgefunden worden *).

Leitet man anstatt eines Wärmestromes einen galvanischen Strom J der Länge nach durch eine rechteckige Wismuthplatte, so lassen sich im magnetischen Felde an den freien Rändern der Platte Temperaturänderungen nachweisen, indem die Temperatur des einen Randes erhöht, jene des anderen erniedrigt wird. Der Versuch wurde von v. Ettingshausen **) in folgender Form gemacht. Zwei gleiche Wismuthplatten (Fig. 851), jede 3,5 cm lang, 2,5 cm breit und etwa 0,4 mm dick, waren mit ihren Flächen parallel neben einander derart an zwei dicke Kupferdrähte A, B gelöthet, dass ein Strom J sie getheilt durchfloss; zwischen die Platten, deren Abstand nahe 1 mm betrug, waren die Löthstellen a und b eines aus Neusilber- und Kupferdraht bestehenden Thermoelementes, durch Glimmerblättchen g, g von den Platten sorgfältig isolirt, am oberen und unteren Plattenrande eingeschoben. Das Thermoelement stand mit einem Galvanometer G in Verbindung, so dass durch dessen Angaben der Temperaturunterschied der Löthstellen des Thermoelementes gemessen wurde.

Fig. 851.



Hatte der Strom J die Richtung des Pfeiles in der Figur und flossen die Ampère'schen Ströme des magnetischen Feldes im Sinne des gefiederten Pfeiles, so trat am oberen Plattenrande Temperaturerhöhung, am unteren dagegen Temperaturerniedrigung ein; das Umgekehrte fand statt, wenn entweder die Richtung des Plattenstromes J oder jene des Magnetfeldes commutirt wurde. Die Temperaturänderungen an den

*) Grimaldi (R. Acc. dei Lincei, Rend. 3, 3. 1887) hat im Wismuth ebenfalls den longitudinalen thermomagnetischen Effect beobachtet, die Erscheinung aber anders gedeutet.

**) Wied. Ann. XXXI, S. 737 (1887).

Stellen a und b treten nicht plötzlich, sondern allmälig ein, man muss daher die Ablesung des Galvanometers G jedesmal erst einige Zeit (1 Minute) nach Schliessung resp. Oeffnung des Stromes, der den Elektromagnet erregt, nehmen.

Bei reinem Wismuth war die Temperaturdifferenz der Ränder proportional mit der Intensität des Plattenstromes und der Stärke des Magnetfeldes; A. v. Ettingshausen nennt die Erscheinung „galvanomagnetische Temperaturdifferenz“. Bei einem Plattenpaar, jede Platte 3 cm breit und 0,8 mm dick, beobachtete er einen Temperaturunterschied des oberen und unteren Randes von circa 6⁰ C., als das magnetische Feld $M = 7700$ (C.G.S.) commutirt wurde; der die beiden Platten durchfliessende ungetheilte Strom hatte die Intensität 12,8 Amp. In Platten aus Eisen, Nickel und Kobalt war die Erscheinung trotz Anwendung kräftiger Ströme und starker Magnetfelder nicht aufzufinden, sie zeigte sich aber in einer Platte aus Tellur und zwar im gleichen Sinne wie bei Wismuth; in äusserst geringem Grade auch bei reinem Antimon.

Die Ursache der Temperaturungleichheit in der Platte scheint, nach den darüber angestellten Experimenten, nicht in einer Aenderung der Stromesdichte zu liegen, welche die magnetische Kraft in den Plattentheilen etwa veranlassen könnte. Die einfachste Annahme ist — nach Boltzmann —, dass im Wismuth ein elektrischer Strom die Wärme im Magnetfelde fortbewege in einer Richtung, welche senkrecht steht sowohl auf jener des Stromes, als auf jener der magnetischen Kraftlinien.

Nach dem oben Angeführten findet die Fortbewegung der Wärme in der Platte bei der (in der Fig. 851) angenommenen Stromesrichtung J und dem durch den gefiederten Pfeil charakterisirten magnetischen Felde in der Richtung von b nach a statt; in Folge der Wärmeleitung tritt dann ein Fliessen der Wärme von a nach b ein. Die in der ersteren Richtung bewegte Wärmemenge wird nun stets überwiegen, da von der zurückfliessenden ein Theil an die Umgebung verloren geht; befände sich die Platte in einem die Wärme gut leitenden Mittel, so würde nur die erstgenannte Wärmeströmung (von b gegen a) vorhanden sein, während dabei die Plattenränder gar keine Temperaturdifferenz besässen. Nimmt man nun an, dass auf den von b nach a gerichteten „galvanomagnetischen“ Wärmestrom der Magnetismus ebenfalls wirke, wie auf den gewöhnlichen in Folge der Temperaturdifferenz der Plattenränder hervorgerufenen (also von a nach b gerichteten), so würde dadurch ein transversaler thermomagnetischer Strom erzeugt, dessen Richtung jener des Stromes J entgegengesetzt ist, wodurch also J geschwächt wird. Es fände dann zwischen der galvanomagnetischen Temperaturdifferenz und dem thermomagnetischen Effect eine ähnliche Beziehung (Reciprocität) statt, wie etwa zwischen dem Peltier'schen Phänomen und den thermoelektrischen Erscheinungen. Auch das Verhalten von Legirungen aus Wismuth und Zinn scheint auf einen gewissen Zusammenhang zwischen den beiden Phänomenen zu deuten.

Es mag hier noch bemerkt werden, dass die stark magnetischen und diamagnetischen Substanzen unter Einwirkung des Magnetismus auch eine Veränderung des elektrischen Leitungsvermögens zeigen. So hat W. Thomson*) (1856) bemerkt, dass der Widerstand von Platten aus Eisen und Nickel, die mit ihrer Fläche parallel den magnetischen Kraftlinien stehen, ein wenig zunimmt in der Richtung der Kraftlinien, dagegen abnimmt in der darauf senkrechten Richtung. Ebenso wächst der Widerstand von Eisendrähten, wenn sie sich in der Axe einer Magnetisirungsspirale befinden**); dasselbe fand Tomlinson***) für Drähte von Eisen, Nickel, Kobalt, Wismuth und Stahl, wenn sie longitudinal magnetisirt werden (am stärksten für Nickel). Während diese Widerstandsveränderungen relativ nur gering sind, tritt bei Wismuthplatten oder Stangen, welche in ein magnetisches Feld gebracht werden, eine ausserordentlich grosse Wirkung auf.

Righi†) fand (1883), dass bei senkrechter Stellung einer Wismuthplatte zu den Kraftlinien des Magnetfeldes die Zunahme des elektrischen Leitungswiderstandes bis zu 12 Proc. betragen kann; nach v. Ettingshausen††) erreicht die Widerstandszunahme von sehr reinem Wismuth in einem kräftigen Magnetfelde (11 000 C. G. S.) über 40 Proc.

Die Versuche von Goldhammer†††) und Faè§) ergaben, dass bei den stark magnetischen Metallen (Eisen, Nickel, Kobalt) der Widerstand, wenn die Platten parallel zu den Kraftlinien stehen, in der Richtung der letzteren zunimmt, in der dazu senkrechten Richtung dagegen abnimmt; bei den stark diamagnetischen Substanzen (Wismuth, Antimon, Tellur) findet jedesmal eine Zunahme statt. Steht die Ebene der Platte senkrecht zu den magnetischen Kraftlinien, so zeigt sich bei Eisen, Nickel und Kobalt eine kleine Abnahme des Widerstandes, bei Wismuth, Antimon und Tellur eine Zunahme. Nach v. Ettingshausen ist in letzterem Falle die Widerstandsvermehrung für Antimon 1,15 Proc., im magnetischen Felde 10 600, für Tellur nur 0,17 Proc., im Felde 8500.

Viel schwächer als in reinem Wismuth tritt die Erscheinung auch bei den Legirungen von Wismuth mit Zinn, Blei und Cadmium auf; keine oder höchst unsichere Wirkung zeigte sich bei Kupfer, Aluminium, Zinn, Zink, Silber, Gold, Packfong etc.

Von Righi§§) und Leduc§§§) wurde ferner beobachtet (1887), dass in einer von Wärme durchströmten Wismuthplatte die Isothermen im

*) Phil. Trans. 1856, 3, S. 737; Math. and Phys. Papers 2, p. 307, 1884.

**) Beetz, Pogg. Ann. CXXVIII, S. 202, 1866.

***) Wied. Ann. Beibl. VI, S. 291, 1881.

†) Mem. di Bologna, p. 118 1883; Acc. dei Lincei 1884; auch Hurion, C. R. 98, S. 1257.

††) Sitzungsber. d. Wiener Akad. LXXXXVI, S. 787, 1887.

†††) Goldhammer, Wied. Ann. XXXI, S. 360, 1887.

§) Faè, Atti del R. Istituto Veneto (5) Ser. 6, 1887

§§) Mem. d. R. Acc. dei Lincei, Rendic. (4) 3, p. 6.

§§§) C. R. 104, p. 1783.

Magnetfelde gedreht werden; die Drehung erfolgt in demselben Sinne, wie die Aequipotentiallinien in diesem Metall durch magnetische Kräfte gedreht werden (Hall'sches Phänomen). Auch wird die Wärmeleitungsfähigkeit des Wismuths durch den Magnetismus vermindert, und zwar nach Righi und Leduc etwa in demselben Maasse wie die elektrische Leitungsfähigkeit, während nach v. Ettingshausen die erstere Verminderung weitaus geringer ist.

Im longitudinal magnetisirten Eisen wurde eine Verminderung der thermischen Leitungsfähigkeit von Maggi (1850) und Tomlinson*) (1878) beobachtet; doch sind diese Resultate nach neueren Untersuchungen von Trowbridge und Penrose**), Naccari und Bellati***) einigermaassen zweifelhaft geworden, während Batelli†) wieder einen sehr geringen Einfluss bemerkt hat.

257 **Elektricitätsentwickelung in Krystallen durch Aenderungen von Temperatur und Druck.** Im Jahre 1707 berichtete der sächsische Stabsmedicus Daumius in dem Buche „Curiose Spekulationen bei schlaflosen Nächten" über die Beobachtung, dass erhitzter Turmalin eine Anziehung auf Aschentheile ausübe. Aepinus erkannte 1756, dass man es dabei mit elektrischen Kräften zu thun habe, dass die beiden Enden des Krystalles entgegengesetzte Pole haben und dass die Orientirung desselben von der Krystallstructur abhängig sei. Er beobachtete entgegengesetzte Elektrisirung in der Wärme und in der Kälte. Canton wies 1758 nach, dass nicht der warme Zustand, sondern die Aenderung der Temperatur die elektrischen Erscheinungen hervorrufe, dass derselbe Pol bei steigender und sinkender Temperatur entgegengesetzte Ladung annehme; er zeigte, dass ein zerschnittener Krystall wie ein getheilter Magnet wiederum beide entgegengesetzten Pole besitze. Er entdeckte endlich, dass auch der brasilianische Topas diese Eigenschaften zeige. Diese Entdeckungen wurden von Hauy, Brewster, Köhler, Riess, G. Rose u. A. auf andere Krystalle ausgedehnt und erweitert. Von Brewster wurde für diese Erscheinung die Bezeichnung Pyroelektricität eingeführt, welche insofern nicht gut gewählt ist, als die Erscheinung durchaus nicht hohe Temperaturen erfordert, vielmehr über 200° meistens erlischt, weshalb Hankel, dem wir die ausführlichsten Untersuchungen über diesen Gegenstand verdanken, die Bezeichnung Thermoelektricität der Krystalle vorgeschlagen hat. Hankel untersuchte die Krystalle in der Weise, dass er sie in Kupferfeillicht eingebettet erhitzte, dann durch Bestreichen mit einer Alkoholflamme unelektrisch machte und hierauf während der Abkühlung in

*) Wied. Ann. Beibl. II, S. 291, 1878.
**) Wied. Ann. Beibl. VIII, S. 143, 1883.
***) Wied. Ann. Beibl. I, S. 475, 1877.
†) Wiedem. Ann. Beibl. 10, S. 780, 1886

seinem Elektroskop auf die Goldblättchen wirken liess. Während Hauy als Bedingung der thermoelektrischen Wirksamkeit eine Unsymmetrie in der Ausbildung der Enden einer krystallographischen Axe (Hemimorphismus) annehmen zu müssen glaubte, kommt nach Hankel die Thermoelektricität allen Krystallen zu, welche genügend schlecht leiten, um eine Ansammlung entgegengesetzter Elektricitäten zu gestatten, und bei welchen eine Verschiedenheit (Ungleichwerthigkeit) zwischen den krystallographischen Axen vorhanden ist. Bei den hemimorphen Krystallen werden die Enden der Axen entgegengesetzt, bei den übrigen gleichnamig elektrisch. Bei einigen Krystallen (Boracit und Titanit) wechselt das Zeichen der Elektrisirung sowohl bei steigender als bei sinkender Temperatur einmal oder sogar zweimal. Bezüglich der Resultate der Untersuchung einzelner Krystalle verweisen wir auf die Zusammenstellung der Arbeiten von Hankel, Friedel u. A. in Wiedemann's Lehre von der Elektricität*). Gaugain**) gelangte durch seine Versuche an Turmalinkrystallen zu folgenden Sätzen:

I. Wenn man eine beliebige Anzahl von Turmalinen zu einer Batterie vereinigt, indem man ihre gleichnamigen Pole mit einem Kupferdraht umschliesst, so ist die von denselben gelieferte Elektricitätsmenge gleich der Summe derjenigen, welche von den einzelnen Turmalinen unter denselben Umständen erzeugt worden wären.

II. Wenn man eine Reihe von Turmalinen mit gleichem Querschnitt hinter einander schaltet, indem man die ungleichnamigen Pole durch Kupferdrähte verbindet, so ist die von der Säule gelieferte Elektricitätsmenge nicht grösser, als die von einem einzelnen erregte.

III. Die von einem Turmalin entwickelte Elektricitätsmenge ist proportional seinem Querschnitte und unabhängig von seiner Länge.

IV. Die Elektricitätsmenge, welche ein Turmalin entwickelt, wenn seine Temperatur um eine gewisse Anzahl von Graden sinkt, ist unabhängig von der dazu erforderlichen Zeit.

V. Die bei einer Temperaturerhöhung entwickelte Elektricitätsmenge ist ebenso gross, wie die einer gleich grossen Temperaturerniedrigung entsprechende.

Die neueren Untersuchungen von E. Riecke***), bei welchen insbesondere der Einfluss der Zerstreuung der Elektricität durch eine gewisse schwache Leitungsfähigkeit der Oberfläche des Turmalins beachtet wurde, führten zu ziemlich complicirten Formeln für den Verlauf der elektrischen Ladungen, welcher ausser von der Maximalladung und der Zeit der Abkühlung noch von der Leitungsfähigkeit der Ober-

*) Bd. II, S. 315 bis 341.
**) Ann. de Chim. et de Phys. (3) 57.
***) Wiedem. Ann. 28, S. 43, 1886.

fläche, von Masse und Oberfläche des Krystalles, seiner specifischen Wärme und seiner äusseren Wärmeleitungsfähigkeit abhängt. Die von Riecke auf Grund seiner Versuche aufgestellte Theorie der Pyroelektricität nimmt an, dass die Molekeln des Turmalins eine permanente elektrische Polarisation in der Richtung der Säulenaxe besitzen. Man kann sich also einen Turmalin analog constituirt vorstellen, wie einen Magnetstab. An Stelle der Molecularmagnete mit Nord- und Südpol treten Molekeln mit positivem und negativem Pole. Während sich innerhalb des Turmalins die entgegengesetzten Fernwirkungen aufheben, kommt es gegen die Enden hin zu einer resultirenden, so dass dort, analog wie beim Magnet, Wirkungen auftreten, als ob daselbst eine freie elektrische Oberflächenschichte vorhanden wäre. Die Grösse der so entstandenen Polarität ist eine Function der Temperatur, ändert sich also beim Erhitzen und beim Abkühlen. Da nun aber die Oberfläche unter gewöhnlichen Umständen etwas leitend ist, so sammelt sich alsbald auf der Oberfläche der Pole eine elektrische Schichte, welche der mit der molecularen Elektricität äquivalenten Ladung gerade entgegengesetzt ist und dieselbe für gewöhnlich compensirt. Erhitzt man den Krystall oder kühlt ihn ab, so ändert die moleculare elektrische Wirkung ihre Grösse, die Compensation durch die Oberflächenschichte wird zeitweilig gestört, der Krystall erscheint daher elektrisch. Bleibt die neue Temperatur längere Zeit constant, so erlangt die Oberflächenschichte durch Leitung allmälig wieder die zur Compensation nöthige Ladung. Lässt man daher einen Turmalin längere Zeit in einem Heizraume mit constanter Temperatur, so zeigt er sich unmittelbar nach dem Herausnehmen nicht elektrisch, er wird es aber während er sich abkühlt, weil die Aenderung der molecularen Elektrisirung der Aenderung der oberflächlichen Ladung voraneilt. Hat die Abkühlung aufgehört und bleibt die niedrige Temperatur constant, so holt die Aenderung der oberflächlichen Ladung jene der molecularen endlich ein, die Compensation der elektrischen Wirkungen nach aussen wird wiederum hergestellt, der Krystall erscheint daher nicht mehr elektrisch. Diese Theorie erhielt jüngst*) eine directe Bestätigung durch den Nachweis, dass der erhitzte Turmalin nach dem Abkühlen bei constanter Temperatur längere Zeit nahezu permanent elektrisch erhalten werden kann, wenn man die Bildung der compensirenden Oberflächenladung verhindert. Dies erreicht man, indem man den erhitzten Turmalin an einem Kokonfaden innerhalb der Glocke einer Luftpumpe aufhängt, deren Luft gut getrocknet, von Staub befreit und etwas verdünnt worden ist. An einem unter derselben Glocke aufgestellten Goldblattelektroskop, dessen Knopf einem der Turmalinpole nahe stand, lässt sich die permanente Ladung nachweisen. So wurde z. B. in einem Versuche der Turmalin um 11 h 25 m aus dem Heizkasten

*) Riecke, Wiedem. Ann. 31, S. 889, 1887.

mit der Temperatur von 106° entnommen und in die Glocke gestellt, welche mit Schwefelsäure getrocknet war und durch drei Pumpenzüge verdünnt wurde.

Die nach Millimetern gemessenen Ausschläge der Goldblättchen waren

zur Zeit:	12 h 5 m	12 h 45 m	3 h 40 m	4 h 47 m	7 h 55 m
Ausschlag	21	21	19	18	17,5

Obwohl die Temperatur schon nach 30 Minuten nahe constant geworden, blieb der Turmalin noch acht Stunden lang nahe gleich stark elektrisch.

Es liegt nahe, die Riecke'sche Theorie der Pyroelektricität des Turmalins auf die anderen pyroelektrischen Krystalle zu übertragen und demnach anzunehmen, dass die Molekeln derselben mit einem im Allgemeinen mehrpaarigen System von Polen ausgerüstet seien, welche in bestimmter Weise zu einander orientirt sind und zu den elastischen Eigenschaften der Krystalle in Beziehung stehen.

Auch durch Bestrahlung mit Licht können Krystalle elektrisch werden (Photoelektricität, Actinoelektricität). Noch auffallender geschieht dies in Folge von Druck, wie zuerst Curie beobachtet hat (Piezoelektricität). Drückt man z. B. einen hemiëdrischen Krystall in der Richtung seiner Axe zwischen isolirenden Backen zusammen, so treten an seinen Enden entgegengesetzte Ladungen auf. Werden dieselben entfernt, so treten bei der Entspannung Ladungen mit entgegengesetzten Zeichen auf. Auch hier gilt Reciprocität, indem durch Elektrisiren Dilatationen oder Verkürzungen zu erhalten sind; auch hier gilt ferner ein dem Gesetz von Lenz analoges Gesetz: Jede primäre Action bringt eine conjugirte secundäre Action hervor, welche der primären Action entgegenwirkt. Auch mit dem Gesetz von der Erhaltung der Elektricität sind diese Erscheinungen in Zusammenhang gebracht worden*).

Zur experimentellen Untersuchung des thermoelektrischen, actinoelektrischen und piezoelektrischen Verhaltens der Krystalle hat A. Kundt**) ein einfaches Verfahren angegeben. Man bestäubt die Krystalle durch ein engmaschiges Baumwollensieb mit einem Gemisch von Schwefel- und Mennigpulver. Da hierbei das erstere negativ, das letztere positiv elektrisch wird, so färben sich die positiv elektrischen Stellen durch den anhängenden Schwefel gelb, die negativen Stellen durch die Mennige roth.

Da wir nicht den Raum erübrigen, das Verhalten der Krystalle zur Elektricität, dessen Studium überdies noch nicht abgeschlossen ist, hier eingehender zu besprechen, so verweisen wir auf die Originalarbeiten

*) Mascart u. Joubert, Lehrb. d. E. u. d. M. Deutsche Uebersetz. von Levy, Bd. I, S. 586 u. 591.

**) Berliner Akad. Ber. XVI, 421 (1883).

von Gaugain, Hankel*), J. und P. Curie**), Friedel***), Röntgen†), Kundt††) und Czermak†††).

258 **Thermomagnetische Motoren. Edisons pyromagnetischer Motor und Stromgenerator.** Im Anhang zur Thermoelektricität mag hier noch ein Gegenstand besprochen werden, welcher zwar mit jener keinen Zusammenhang hat, vielmehr im Anschluss an §. 13, wo vom Einfluss der Wärme auf den Magnetismus die Rede ist, hätte vorgetragen werden sollen. Aus praktischen Gründen haben wir jedoch vorgezogen, ihn an dieser Stelle nachzutragen.

J. Stefan§) hat zuerst darauf hingewiesen, dass man die Eigenschaft des Eisens, in höherer Temperatur seine Magnetisirbarkeit zu verlieren, zur Construction eines Motors benutzen könne. Man lässt ein Stück Eisen im kalten Zustande von einem Magnet unter Arbeitsleistung anziehen und dann im warmen Zustande ohne Arbeitsleistung oder doch mit geringerer Arbeitsleistung wieder zurückziehen. Durch beliebig oft wiederholte Anwendung dieses Processes gewinnt man Arbeit, während ein gewisses Quantum Wärme von höherer Temperatur zu niedrigerer übergeht.

E. J. Houston und Elihu Thomson§§) haben dann 1879 einen Apparat angegeben, welcher aus einer eisernen Scheibe bestand, welche um eine horizontale Axe in der Weise rotiren konnte, dass sich ihr Stand zwischen den Polen eines Hufeisenmagnets senkrecht auf deren Verbindungslinie hindurchbewegte. Hat das Eisen dieser Scheibe links und rechts vom magnetischen Felde gleiche Temperatur, so steht es still; erwärmt man aber die Scheibe auf der einen Seite durch eine Flamme, so verliert dieser Theil die Fähigkeit angezogen zu werden, während der jenseitige kalte Theil der Scheibe noch angezogen wird. Dadurch muss es zur continuirlichen Rotation kommen, da sich der heiss gewordene Theil während des Umlaufs wieder abkühlt.

J. Stefan§§§) ersetzte das Eisen durch Nickel, welches den Vortheil bietet, dass es bei 220° am stärksten magnetisirbar ist und bei 330° schon vollständig unmagnetisch sich erweist. Die Scheibe war durch ein Rad mit Speichen ersetzt. Der Kranz des Rades bestand aus

*) Abhandl. d. Königl. sächs. Ges. XII, 459 (1881).

**) Compt. rend. Bd. 91, pag. 294, 383; Bd. 92, pag. 186, 350; Bd. 93, pag. 117, 204 (1880—1881).

***) Compt. rend. Bd. 91, pag. 383.

†) Wiedem. Ann. XVIII, S. 213, 534.

††) Ebend. S. 228.

†††) Wien. Akad. Ber. XCVI, 1217 (1887); XCVII, 301 (1888).

§) Wiener Akad. Ber. LXIV (2) S. 219 (1871)

§§) Journal of the Franklin Institut 1879, S. 39.

§§§) Wiener Akad. Ber. XCVII (2) S. 70 (1888); daselbst findet sich auch eine mathematische Theorie der thermomagnetischen Motoren.

einem Nickelblech von 2,7 cm Breite, 0,3 mm Dicke und 16 cm Durchmesser, die Speichen aus dünnen Messingröhren. Bei einseitiger Erwärmung des Nickelbleches mittelst eines zweifachen Gasbrenners machte das Rad in der Secunde einen Umgang oder noch mehr.

Nach demselben Principe, wie dieses thermomagnetische Rad, hat Stefan auch ein oscillirendes thermoelektrisches Pendel construirt, dessen äussere Form dem auf Seite 816, Fig. 688 und 689 abgebildeten Inductionspendel v. Waltenhofen's gleicht, bei welchem aber der Kupferstreifen durch einen Nickelstreifen ersetzt ist, welcher einseitig erhitzt wird*).

Edison**) hat dasselbe Princip (August 1887) zur Construction seines pyromagnetischen Motors verwendet. Man denke sich einen Elektromagnet mit horizontal gelegten Schenkeln, zwischen dessen Polschuhen ein eiserner Cylinder mit verticaler Axe rotiren kann. Dieser Cylinder besteht jedoch nicht aus massivem Eisen, sondern aus einem Bündel dünnwandiger Eisenröhren, durch welche von unten an geeigneten diametral gegenüber liegenden Stellen die heissen Flammengase einer darunter befindlichen Feuerung emporsteigen. Jene Theile des Cylinders, welche der Abkühlung ausgesetzt werden sollen, erhalten diese durch die kalte Luft, welche, von der Feuerung angesaugt, von oben durch die hohle Axe eindringt. Ein mit zwei Bunsenbrennern geheizter Apparat dieser Art lieferte 1,67 mkg per Secunde, ein grösserer 680 kg schwerer Motor soll drei Pferdekräfte geleistet haben.

Auf verwandtem Principe beruht Edison's pyromagnetischer Stromgenerator. Wird ein dünnwandiges Eisenrohr, das mit einer isolirten Drahtspirale umgeben ist, und von dem Pole eines kräftigen Magnets selbst magnetisirt wird, abwechselnd zur Rothgluth erhitzt und wieder abgekühlt, so werden in der Drahtspirale Inductionswechselströme hervorgerufen. Bei Edison's Apparat waren acht verticale Röhren aus 0,12 mm dickem Eisenblech im Kreise herum angeordnet und an den oberen wie unteren Enden durch je eine eiserne Scheibe verbunden, welche die Mündungen der Röhren frei liessen. Diese Scheiben bildeten die gemeinsamen Pole der Röhren. Rings herum waren acht Hufeisenelektromagnete in der Weise aufgestellt, dass die Nordpole derselben sämmtlich dem Rande der oberen Scheibe, die Südpole der unteren Scheibe nahe standen, so dass die Röhren gewissermaassen die Anker dieser Elektromagnete bildeten. Die Röhren selbst waren mit Drahtspiralen umgeben, welche durch Asbest von den Röhren isolirt waren. Durch einen rotirenden halbkreisförmigen Schirm unterhalb der Röhren wurde

*) Bei beiden Apparaten lässt sich nach Stefan das Nickel durch Eisen ersetzen, wenn es in Form von Drahtnetz verwendet wird, um die Wärme rasch aufzunehmen und wieder abzugeben.

**) Electrical World 1887, 20. August, p. 105; 27. August, p. 111. Elektrotechnische Zeitschr. 1887, S. 385.

nun abwechselnd je die Hälfte der Röhren erhitzt, die andere Hälfte der Abkühlung ausgesetzt, der in den Drahtspiralen entwickelte Inductionsstrom durch einen Commutator gesammelt und gleich gerichtet. Nach Edison soll diese Umsetzung von Wärme in Stromenergie im Betriebe mindestens ebenso ökonomisch sein, wie die mittelst Dampf- und Dynamomaschine, dagegen hat eine solche Maschine bei gleicher Leistung ein viel grösseres Gewicht. Praktische Bedeutung hat dieselbe bisher nicht erlangt.

Achtes Capitel.

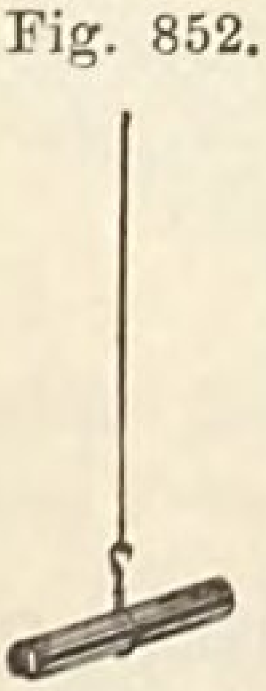
Diamagnetismus; Thierische Elektricität; Anhang.

Die Grunderscheinungen des Diamagnetismus. Faraday 259
machte die Entdeckung, dass genügend starke Magnete nicht allein auf Eisen, Mangan, Chrom, sondern allgemein auf alle Körper einwirken und zwar nicht etwa bloss insofern, als sie in leitenden Körpern, die sich bewegen, Inductionsströme erzeugen, sondern auch, wenn diese Körper nicht leiten und ruhig stehen. Dabei zerfallen alle Körper in zwei Classen.

Die eine Classe, deren hervorragender Repräsentant das Eisen ist, umfasst alle *paramagnetischen* Körper, die andere Classe umfasst die *diamagnetischen* Körper.

Während in der einem Magnetpole genäherten Stelle eines *paramagnetischen* Körpers ein *entgegengesetzter* Pol entsteht, welcher *angezogen* wird, entsteht in einem *diamagnetischen* Körper ein *gleichnamiger* Pol, welcher *abgestossen* wird. Ein Stäbchen eines paramagnetischen Stoffes stellt sich zwischen den Polen eines Magnets mit seiner Längsaxe in die Verbindungslinie der Pole (axial), ein Stäbchen eines diamagnetischen Körpers senkrecht auf die Verbindungslinie (äquatorial). Um dieses Verhalten der diamagnetischen Körper zu zeigen, bringt man ein Stäbchen von *Wismuth*, an Seidenfäden, Fig. 852, so aufgehängt, dass seine Längsaxe horizontal ist und es sich in horizontaler Ebene frei drehen kann, zwischen die beiden Pole eines sehr kräftigen Elektromagnets; man beobachtet dann die merkwürdige Erscheinung, dass sich das Stäbchen rechtwinklig zu den Kraftlinien des magnetischen Feldes stellt und, aus dieser Lage herausgebracht, nach einigen Schwingungen stets wieder in dieselbe zurückkehrt. Man bedient sich zu diesen Versuchen entweder eines grossen

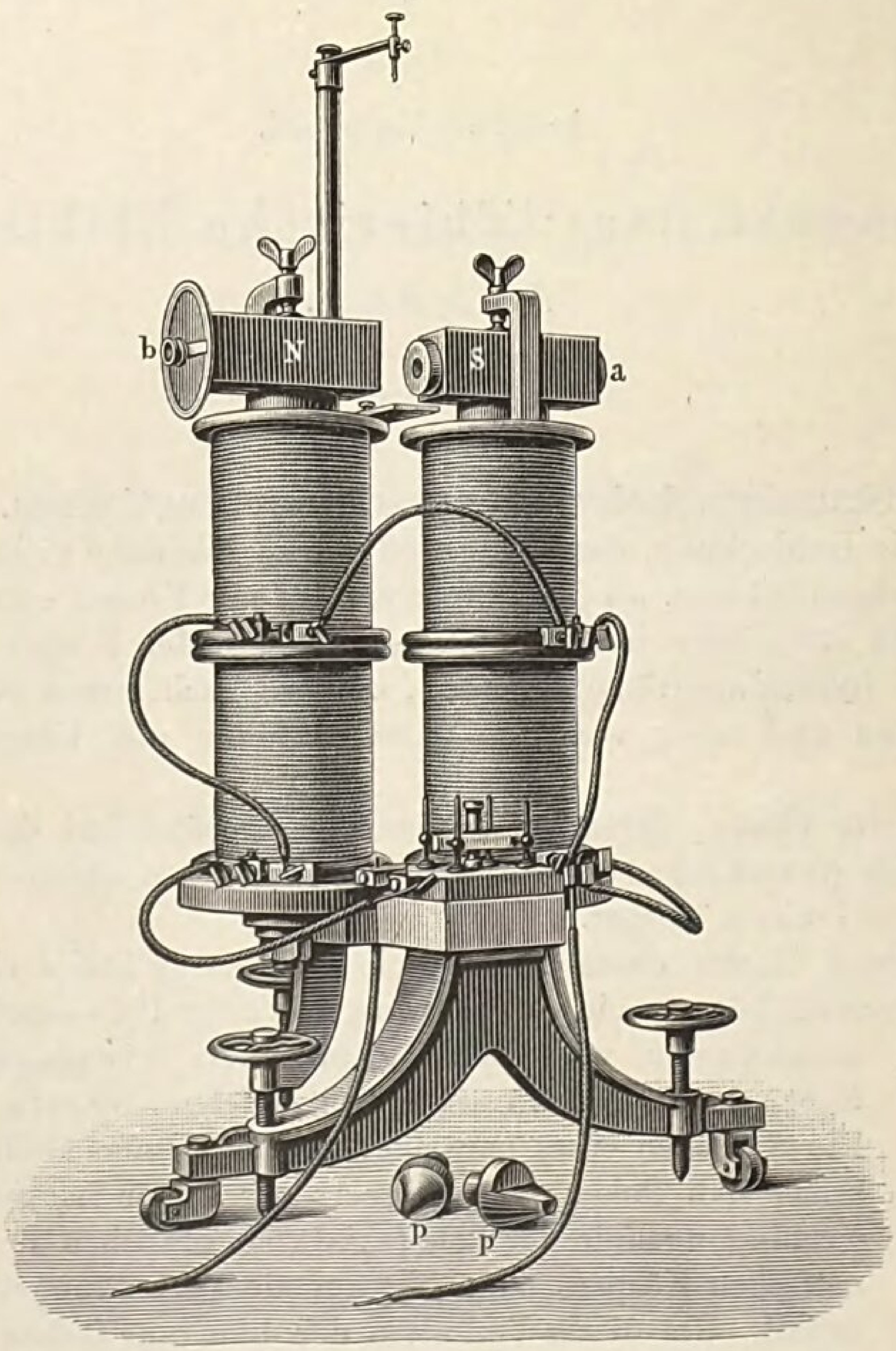
Fig. 852.



Hufeisenelektromagnetes mit verticalen Schenkeln wie Fig. 853, oder eines solchen in der von Ruhmkorff construirten Form Fig. 854 mit horizontalen Schenkeln, deren Axen in einer Geraden liegen*).

Die Pole des Magnets Fig. 522, S. 623 werden mit prismatischen Polschuhen ausgerüstet, die man einander nähern und in beliebiger Stellung festschrauben kann. Ebenso sind die Schenkel *N* und *M* des

Fig. 853.

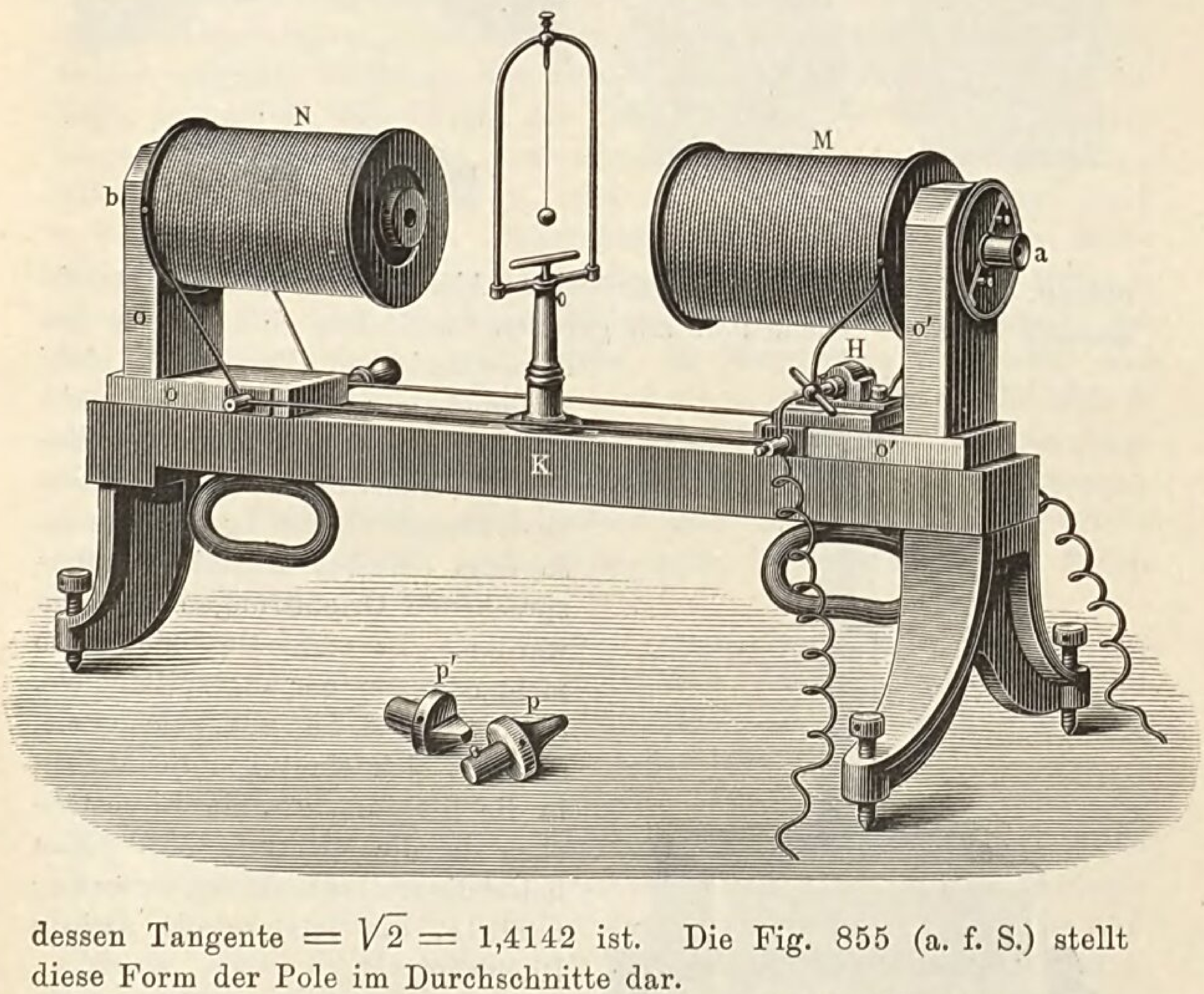


Ruhmkorff'schen Magnets Fig. 853 mittelst der eisernen Träger *O O* und *O' O'* auf der eisernen Schiene *K* verschiebbar und beliebig festzustellen. Zum Zwecke später zu besprechender Experimente sind die Polschuhe der Fig. 853, sowie die Schenkel *N* und *M* in Fig. 854 so durchbohrt, dass man das magnetische Feld in der Richtung der Kraftlinien durchblicken kann. An den Aussenmündungen *a* und *b* dieser Durchbohrungen

*) Diese Figuren sind dem Kataloge von Hartmann u. Braun entnommen.

können optische Apparate eingesetzt werden, die wir zunächst noch nicht benöthigen. Dagegen werden, um die Kraftlinien zu concentriren, an den inneren Mündungen eiserne Fortsätze von wechselnder Form p, p' eingesetzt. Soll das magnetische Feld zwischen den Polen eine möglichst grosse Intensität haben, so ist die Form der Polenden nicht gleichgültig. J. Stefan*) hat berechnet, dass das Maximum der Intensität erreicht wird, wenn man den Enden der Eisenkerne die Form von abgestutzten Kegeln giebt, der Art, dass die Erzeugungslinien der beiden Kegelflächen durch den Mittelpunkt des Feldes gehen und mit seiner Axe einen Winkel von $54^0\ 44'$ oder genau gesagt, einen Winkel bilden,

Fig. 854.



dessen Tangente $= \sqrt{2} = 1{,}4142$ ist. Die Fig. 855 (a. f. S.) stellt diese Form der Pole im Durchschnitte dar.

Soll die Länge des magnetischen Feldes $a\,a'$, Fig. 855, eine andere werden, so darf man dies nicht durch Verschieben der Eisenkerne bewerkstelligen, da sonst die Erzeugenden der Kegelflächen $o\,m$ und $o\,m'$ nicht mehr durch die Mitte des Feldes gehen würden, man muss vielmehr die Abstutzungsebenen der Kegel verlegen, das heisst, man muss die Pole mit stärker oder weniger stark abgestutzten kegelförmigen Ansätzen versehen. Jeder dieser Ansätze giebt dann nur für jene Länge

*) Wiener Akad. Ber. XCVII, S. 176 (1888).

des magnetischen Feldes das Maximum der Wirkung, welche der obigen Constructionsregel entspricht. Sobald der Abstand aa' die Grösse $\frac{d}{\sqrt{2}} = 0{,}71\ d$ (worin d den Durchmesser der Eisenkerne bedeutet) überschritten hat, nützt eine Zuspitzung der Eisenkerne nichts mehr; will man also massive cylindrische Pole mit gerade abgeschnittenen Enden in Bezug auf Länge und Stärke des Magnetfeldes möglichst aus-

Fig. 855.

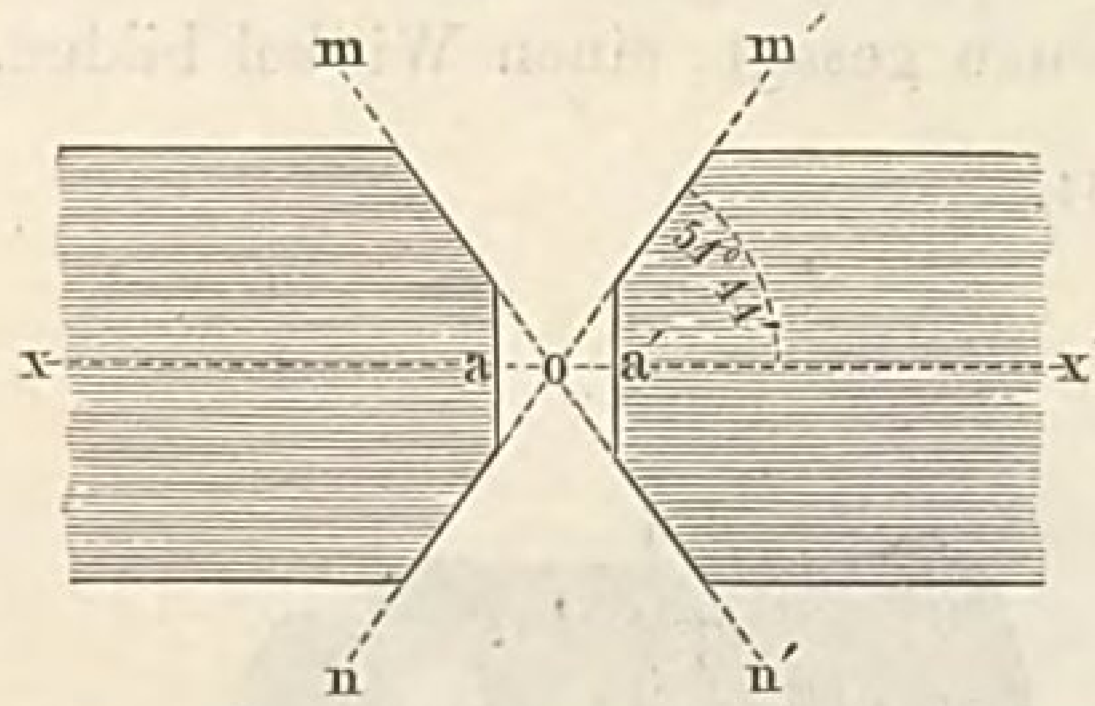


Fig. 856.

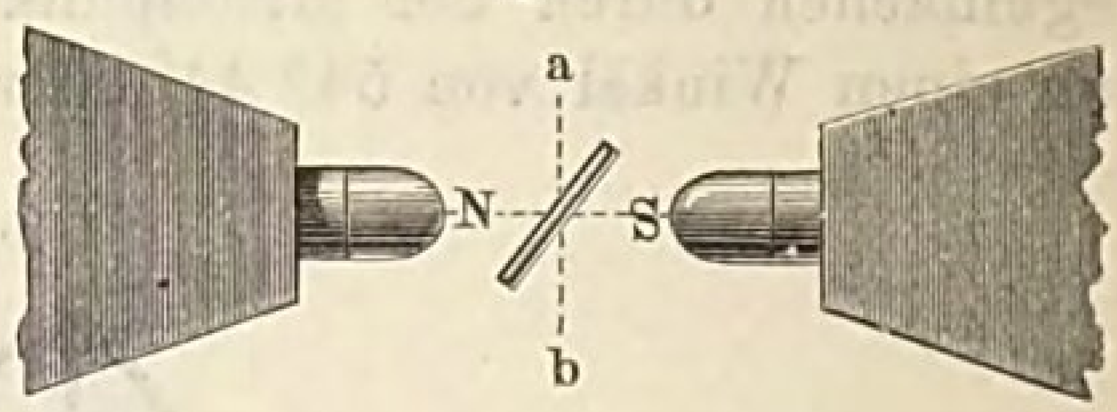
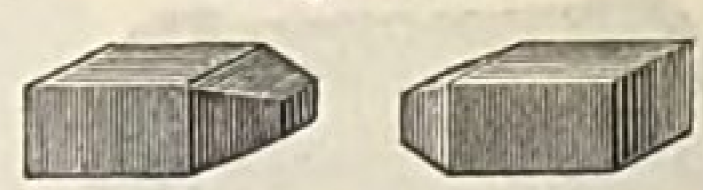
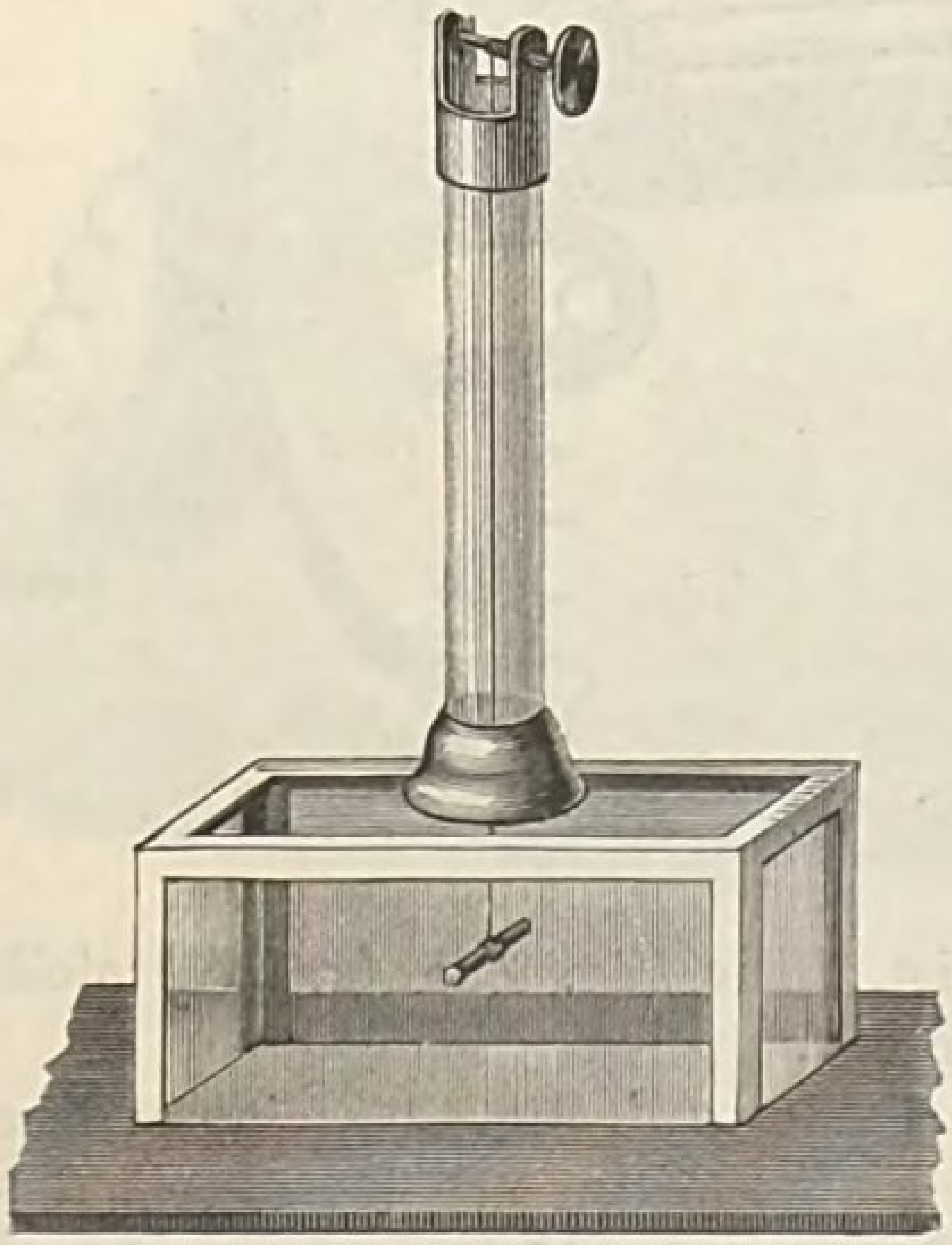


Fig. 857.



nutzen, so wird man ihren gegenseitigen Abstand = 0,71 des Durchmessers wählen. Solche Pole mit geraden Endflächen sind aber zu den diamagnetischen Versuchen nicht geeignet, weil die Kraftlinien nahe an den Endflächen durch den Einfluss der Kanten eine von der axialen abweichende Richtung annehmen, so dass daselbst scheinbar widersprechende Orientirungen erhalten werden. Es empfehlen sich also mehr oder weniger zugespitzte Pole. Sind N und S, Fig. 856, solche Pole, so stellt sich ein Wismuthstäbchen in die Richtung ab, ein Eisenstäbchen in die Richtung NS. Man heisst die erstere Richtung die **äquatoriale**, die letztere die **axiale** Richtung.

Fig. 858.



Selbst schwächere Elektromagnete, wie der in Fig. 520, Seite 622 abgebildete, genügen, um die äquatoriale Einstellung vieler Substanzen zu zeigen. Man legt zu diesem Zwecke auf die Pole dieses Elektromagnets Halbanker von der Form Fig. 857, zwischen denen man das zu prüfende Stäbchen aufhängt. — Will man das aufgehängte Stäbchen vor Luftströmungen schützen, so kann man dasselbe mit einem Glaskasten umgeben. Fig. 858 zeigt eine zu diesem Zwecke für den Elektromagnet Fig. 520, S. 622 in möglichster

Einfachheit construirte Vorrichtung. Die Kanten des Glaskastens sind mit Papier verklebt. Die obere Glasplatte hat in der Mitte ein Loch, über welchem sich eine Glasröhre erhebt; an dem oberen Ende ist eine Fassung mit einem horizontalen drehbaren Stäbchen angebracht, an welchem der Seidenfaden hängt, der den zu untersuchenden Körper trägt. Durch Drehen dieses Stäbchens kann man den unten hängenden Körper beliebig heben und senken.

Die Glasröhre steckt unten in einer ringsum mit Tuch belegten Holzfassung, die auf die obere Glasplatte des Kästchens aufgeleimt ist; man kann also die ganze Glasröhre sehr sicher um ihre verticale Axe umdrehen und dadurch das Stäbchen in die beliebige Lage bringen.

Wenn das zu prüfende Stäbchen in gehöriger Weise zwischen den beiden Polspitzen aufgehängt und in einer Lage zur Ruhe gekommen ist, welche ungefähr zwischen der axialen und äquatorialen in der Mitte liegt, so wird es, sobald man die Kette schliesst, welche den Elektromagnet in Thätigkeit setzt, entweder nach der axialen Lage getrieben, wie z. B. ein Platinstäbchen, oder nach der äquatorialen Lage, wie z. B. ein Wismuthstäbchen. Begreiflicher Weise kommt aber das Stäbchen nicht sogleich in seiner neuen Gleichgewichtslage zur Ruhe, sondern es schwingt um diese Gleichgewichtslage mit einer Geschwindigkeit, die von der Stärke abhängt, mit welcher die Magnetpole einwirken. Bei einiger Stärke des Elektromagnets sind diese Oscillationen sehr lebhaft und unterscheiden sich dadurch sehr wesentlich von den äusserst langsamen Schwingungen des Stäbchens, welche eine Folge der schwachen Torsion des Seidenfadens sind; sobald man die Kette öffnet, oscillirt das Stäbchen wieder sehr langsam um seine frühere, durch den Faden bedingte Gleichgewichtsstellung.

Stellt man nun den Versuch in der angegebenen Weise mit Stäbchen verschiedener Substanzen an, so findet man, dass alle, wenn auch mit sehr ungleicher Energie, entweder äquatorial oder axial gestellt werden. Die Tabelle (a. f. S.) giebt hierüber Aufschluss.

Auch flüssige Körper zeigen sich entweder paramagnetisch oder diamagnetisch. Um sie dem Versuch zu unterwerfen, füllt man sie in dünnwandige Glasröhren, welche für sich allein mit so geringer Kraft äquatorial eingestellt werden, dass in den meisten Fällen die Einwirkung, welche die Magnetpole auf die in der Röhre enthaltene Flüssigkeit ausüben, weitaus überwiegend ist. Sind solche Röhren mit einer Auflösung von Eisensalzen gefüllt, so stellen sie sich axial.

Paramagnetisch verhalten sich die Eisenlösungen, diamagnetisch: Wasser, Alkohol, Aether, Schwefelkohlenstoff, Säuren, Oele.

Die Abstossung diamagnetischer Körper durch die Magnetpole lässt sich am auffallendsten folgendermaassen zeigen. Man hänge an den Seidenfaden statt des Stäbchens eine kleine Kugel von 2 bis 6 mm Durchmesser, deren Substanz sehr stark diamagnetisch ist, also etwa ein Kügelchen von Wismuth. Die Pole S und N nähert man nun so weit, dass sie

nur unbedeutend mehr von einander abstehen, als der Durchmesser des Kügelchens beträgt. So lange die Kette nicht geschlossen ist, kann man bewirken, dass das Kügelchen gerade in der Mitte zwischen den beiden Polen hängt; sobald man aber die Kette schliesst, wird das Kügelchen seitwärts zwischen den beiden Spitzen herausgetrieben, so dass der Faden, an dem es hängt, merklich von der verticalen Richtung abgelenkt ist. Beim Oeffnen der Kette fällt das Kügelchen wieder zurück.

Paramagnetisch sind:		Diamagnetisch sind:	
	Metalle.		
Eisen,	Platin,	Wismuth,	Kupfer,
Nickel,	Osmium,	Antimon,	Gold,
Kobalt,	Silicium,	Zink,	Arsen,
Mangan.	Beryllium,	Zinn,	Uran,
Chrom,	Aluminium,	Cadmium,	Rhodium,
Cer,	Kalium,	Quecksilber,	Iridium,
Titan,	Natrium.	Blei,	Wolfram.
Palladium,		Silber,	
	Metalloide.		
—		Tellur (stark),	
—		Selen,	
—		Schwefel,	
—		Phosphor.	
	Zusammengesetzte Körper.		
Die meisten Eisenverbindungen, Nickelsalze, Mangansalze; eisenhaltiges Gas.		Glas (wenn eisenfrei), Bergkrystall, Gyps, Schwerspath, Kalkspath, Glaubersalz, Bittersalz, Seignettesalz, Alaun, Salmiak, Chlorblei, Kochsalz, Salpeter, Soda, Bleizucker, Bleiglätte, Brechweinstein, Harz, Wallrath, Wachs, Kautschuk, Gummi, Zucker, Stärke, Elfeinbein, Blut, Leder, Fleisch, Brot, lebende Thiere.	

Es ist dies ein Beweis einer kräftigen Abstossung, welche beide Polspitzen auf das Kügelchen ausüben.

Plücker beobachtete die auffallende Erscheinung, dass ein Kohlenstäbchen sich axial zwischen die Polspitzen eines Elektromagnets stellte, so lange nur ein schwacher Strom die Spiralen durchlief; sobald aber

durch stärkere Ströme ein kräftiger Magnetismus in den Eisenkernen erzeugt wurde, nahm das Kohlenstäbchen die äquatoriale Stellung ein.

Durch Zusammenschmelzen von Stanniol, der wahrscheinlich wegen seines Eisengehaltes magnetisch war, mit Wismuth, gelang es ihm, Stäbchen anzufertigen, die sich gleichfalls zwischen schwachen Magnetpolen axial, zwischen starken äquatorial stellten.

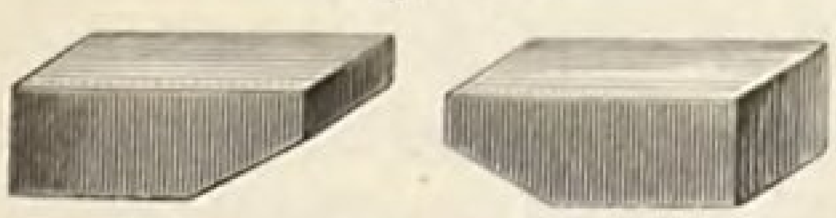
Es ist dies die Folge eines ganz schwachen Eisengehaltes. Plücker zeigte, dass überhaupt die magnetischen Substanzen, denen eine ganz geringe Menge Eisen beigemischt ist, sich schwachen Magnetpolen gegenüber paramagnetisch verhalten, von stärkeren aber abgestossen werden.

Diese auf den ersten Anblick sehr auffallende Erscheinung findet eine sehr einfache Erklärung durch die von J. Müller nachgewiesene Thatsache, dass das Eisen nicht über eine bestimmte Grenze hinaus magnetisirt werden kann, und dass für geringe Eisenmassen schon schwache magnetisirende Kräfte hinreichen, das Maximum des Magnetismus zu erzeugen. Bedenken wir nun, welch geringe Massen magnetischer Substanzen in den Körpern vertheilt sind, mit welchen Plücker experimentirte, so dürfen wir wohl annehmen, dass dieselben schon bei geringerer Stromstärke nahe bis zu ihrem Maximum magnetisirt sind, dass also die Variationen der Stromstärke keinen bedeutenden Einfluss mehr auf sie ausüben können, während der Diamagnetismus der ungleich grösseren Masse nicht magnetischer Substanzen der Stromstärke proportional wächst.

Sehr interessante Erscheinungen beobachtete Plücker, als er Flüssigkeiten in folgender Weise dem Einflusse der Pole eines Elektromagnets aussetzte. Auf jeden der Pole wurde ein eiserner Halbanker von der Fig. 859 dargestellten Form gelegt, und zwar so, dass die zugeschärften Seiten einander zugekehrt sind. Auf den Zwischenraum zwischen den beiden Halbankern wurde nun ein Uhrglas gesetzt, welches die Flüssigkeit enthielt.

Eisenfeilspäne häufen sich an den Kanten der Magnetstäbe am stärksten an, und es liess sich erwarten, dass magnetische Flüssigkeiten, in der erwähnten Weise über die Pole des Elektromagnets gebracht, sich über den Kanten der Halbanker anhäufen würden. Der Versuch bestätigte dies vollkommen.

Fig. 859.



In das Uhrglas wurde eine concentrirte Auflösung von Eisenchlorid gebracht, welche einen Kreis von 25 mm Durchmesser bildete. Sobald durch Schliessung des Stromes die Halbanker in Magnetpole verwandelt werden, krümmt sich die vorher ebene Oberfläche der Flüssigkeit in der Weise, dass sie über den Kanten der Halbanker aufsteigt und hier kleine Hügel bildet. Sind die Halbanker etwas weiter von einander entfernt, wie Fig. 860 (a. f. S.), so bilden sich zwei Hügel, welche durch ein Thal von einander getrennt sind; wenn aber die beiden zugewendeten Kanten der Halbanker sehr genähert sind, wie dies Fig. 861 (a. f. S.) darstellt, so fallen die beiden Hügel in einem einzigen zusammen. In letzterem

Falle muss man die beiden Halbanker durch ein Stückchen Holz aus einander halten, damit sie nicht zusammenfahren.

Eine Lösung von Eisenchlorür zeigte sich schwächer magnetisch, noch schwächer eine solche von Eisenvitriol. Eine Lösung von salpetersaurem Nickeloxyd ist stärker magnetisch als die Lösung des Eisenvitriols.

Plücker unterwarf nun auch diamagnetische Flüssigkeiten demselben Verfahren. Als die Anker bis auf 2,5 mm genähert waren,

Fig. 860.

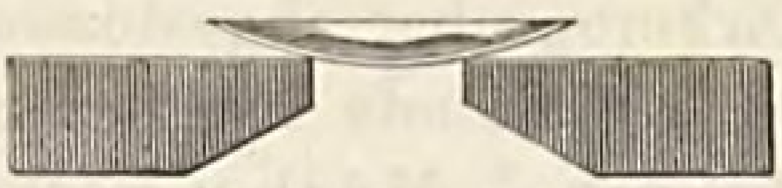


Fig. 861.



dehnte sich die Flüssigkeit nach der axialen Richtung aus, während sie sich nach der äquatorialen zusammenzog. Oberhalb der Mitte zwischen den beiden Halbankern bildete sich statt des früheren Bergrückens ein in der Aequatorialebene sich hinziehendes Thal. — Bei diamagnetischen Flüssigkeiten zeigt sich also ein Zurückweichen von den Kanten der Halbanker, doch sind die Wirkungen schwächer als bei magnetischen Flüssigkeiten.

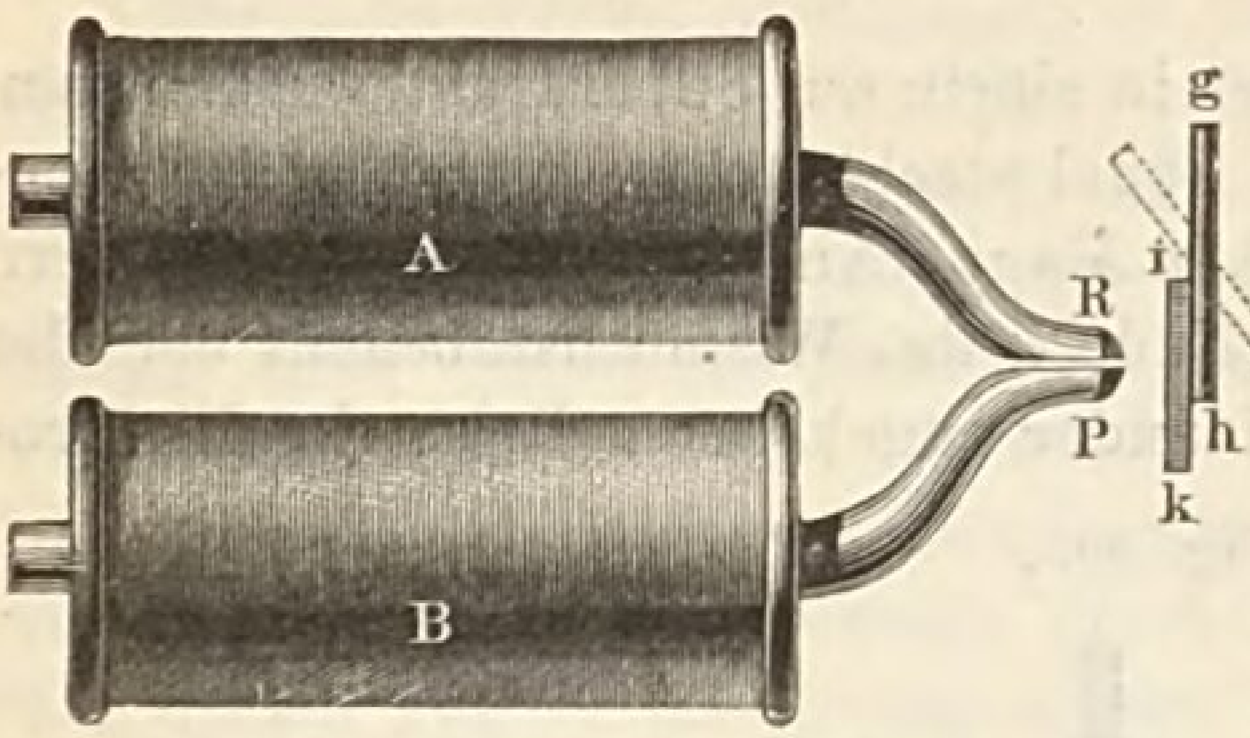
Stärkere Wirkungen als bei Anwendung eines Uhrglases erhält man, wenn man kleinere Quantitäten von Flüssigkeit auf ein Glimmerblatt bringt und dies auf die etwa 3 mm von einander entfernten Halbanker legt.

260 **Diamagnetische Polarität.** Das Verhalten der diamagnetischen Körper gegen Magnetpole liesse sich wohl, wie Faraday bemerkt, durch die Annahme erklären, dass in einem solchen Körper, also z. B. in einem Wismuthstäbchen, durch die Nähe eines Magnetpols Ströme erzeugt werden, welche den Ampère'schen Strömen des Magnets entgegengesetzt sind, so dass gleichnamige Pole einander gegenüber zu stehen kämen, während in magnetischen Metallen mit dem Magnet gleichgerichtete Ströme gebildet werden, so dass sich ungleichnamige Pole einander gegenüberstehen. Dies würde den Strömen in diamagnetischen Körpern gleiche Richtung geben mit denen, welche beim Beginn des inducirenden Stromes in benachbarten Leitern inducirt werden, und in den magnetischen Körpern gleiche mit denen, welche beim Aufhören desselben inducirenden Stromes entstehen. Faraday hat diese Ansicht aber weder ausgebildet noch festgehalten, sondern gegen die von einer indifferenten Repulsion vertauscht.

Eine Wismuthkugel wird sowohl vom Nordpol als auch vom Südpol eines Magnets abgestossen. Wenn aber hier eine indifferente Abstossung stattfände, so müssten ein Nordpol und ein Südpol, von derselben Seite her einer Wismuthkugel genähert, sich in ihren abstossenden Wirkungen unterstützen; Reich und später Tyndall haben aber gezeigt, dass die Wirkungen der beiden Pole sich in diesem Falle neutralisiren, dass also die frühere Ansicht Faraday's die richtige ist.

Der Apparat, mit welchem Tyndall dies nachwies, ist in Fig. 862 schematisch dargestellt. A und B sind zwei kräftige Magnetisirungsspiralen, in denen Stäbe von weichem Eisen stecken, die auf der einen Seite wieder hervorragen und so umgebogen sind, wie die Figur zeigt. Die nur halb cylindrischen Enden P und R dieser Eisenstäbe sind mit ihren flachen Seiten ganz nahe zusammengerückt. Diesen Polen gegenüber ist nun ein Wismuthstab gh an einem Seidenfaden so aufgehängt, dass er durch eine schwache Torsion gegen eine Glasplatte ik angedrückt wird.

Fig. 862.



Wird nun ein Strom so durch die Windungen der beiden Spiralen gesandt, dass P und R gleichnamige Pole werden, so wird der Wismuthstab abgestossen; wird aber alsdann der Strom in der einen Spirale umgekehrt, so dass P und R zu ungleichnamigen Polen werden, so findet gar keine Einwirkung auf das Wismuthstäbchen gh statt.

Tyndall schloss weiter, dass die diamagnetische Abstossung im einfachen Verhältniss der Stromstärke wachsen müsse, wenn sie eine Wirkung des Magnetpols auf die unveränderte Substanz des diamagnetischen Körpers wäre, dass sie dagegen im quadratischen Verhältniss der Stromstärke wachsen müsse, wenn die Abstossung die Folge einer durch den Magnetpol im Wismuth erst hervorgerufenen Polarität ist. Tyndall zeigte nun durch Versuche, dass in der That das letztere der Fall ist. Den Versuch stellte er in der Weise an, dass er ein Wismuthstäbchen zwischen parallel gestellten ebenen Polflächen oscilliren liess. Aus der Zahl der Schwingungen, welche das Stäbchen bei verschieden starker Erregung des Elektromagnets ausführte, konnte er die auf das Stäbchen ausgeübte Kraft ableiten und damit die oben ausgesprochene Beziehung nachweisen.

Reich hat das von Tyndall aufgefundene Gesetz auf einem ganz anderen Wege, und zwar mit Hülfe der Drehwage, deren er sich zur Bestimmung der mittleren Dichtigkeit der Erde bedient hatte, vollkommen bestätigt gefunden*).

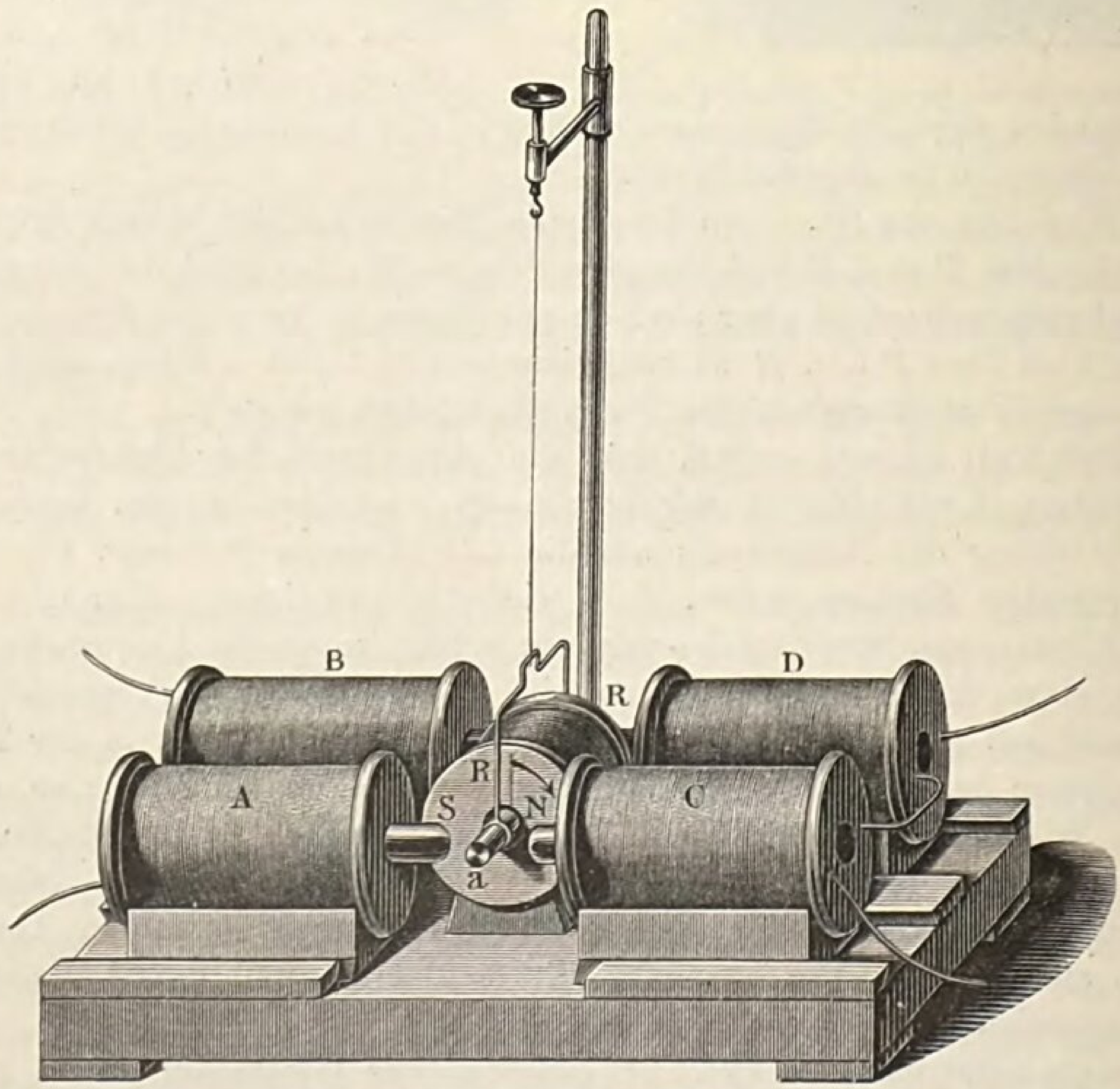
Alle bis jetzt besprochenen diamagnetischen Abstossungen deuten darauf hin, dass in einem diamagnetischen Körper unter dem Einfluss einer magnetisirenden Kraft eine temporäre magnetische Polarität hervorgerufen wird, welche derjenigen entgegengesetzt ist, welche unter denselben Umständen ein Eisenstab würde angenommen haben.

*) Pogg. Annal. Bd. LCVII, S. 283.

Dass in der That eine solche Polarität in einem diamagnetischen Körper durch magnetisirende Kräfte inducirt wird, hat am unzweifelhaftesten Tyndall mit Hülfe des folgenden Apparates, Fig. 863, nachgewiesen *).

Ein Wismuthstäbchen, welches in einem aus Silberdraht verfertigten, an einem Seidenfaden hängenden Bügel steckt, schwebt frei in der inneren Höhlung der kurzen, aber dicken Magnetisirungsspirale *R*. Das vorn aus der Spirale *R* hervorragende Ende *a* des Wismuthstäbchens befindet sich in der Mitte zwischen den einander zugekehrten Polen der Elektro-

Fig. 863.



magnete *A* und *C*, während das hintere Ende in gleicher Weise zwischen den Polen der Elektromagnete *B* und *D* schwebt.

Wird nun durch die Spirale *R* ein Strom in der Richtung des Pfeils hindurchgesendet, so wird dadurch das Wismuthstäbchen diamagnetisch erregt. Wird nun ferner ein Strom durch die Windungen der Elektromagnete so hindurchgesendet, dass *A* und *B* ihre Südpole, *C* und *D* aber ihre Nordpole gegen das Wismuthstäbchen kehren, so erfolgt eine Ablenkung desselben in der Art, dass *a* sich gegen *S* hin bewegt. *a* ist

*) Phil. Trans. 1855.

demnach ein Nordpol, während offenbar, wenn an der Stelle des Wismuthstäbchens ein Eisenstäbchen gewesen wäre, bei der angegebenen Richtung des Stromes *R* sich in *a* ein Südpol gebildet hätte.

Wird der Strom gleichzeitig in den vier Spiralen *A*, *B*, *C* und *D* umgekehrt, so dass nun in *S* ein Nordpol, in *N* ein Südpol entsteht, so wird das Wismuthstäbchen nach der entgegengesetzten Seite abgelenkt.

Zum Gelingen dieses Versuches ist es nothwendig, dass die magnetisirende Kraft der Spirale *R* überwiegend ist über die Wirkung der Elektromagnete *A*, *B*, *C* und *D*, welche sonst die von *R* hervorgebrachte Polarität des Wismuthstäbchens umkehren würden. Wenn der Strom von 15 Bunsen'schen Bechern durch die Spirale *R* ging, so waren nur fünf solcher Becher zur Erregung der vier Elektromagnete nöthig.

Mittelst eigens construirter Apparate, Diamagnetometer genannt, haben W. Weber*) und Tyndall**) nachgewiesen, dass durch elektromagnetische Influenz stets beide diamagnetische Pole und zwar in gleicher Stärke erregt werden. Endlich hat W. Weber***) auch nachgewiesen, dass ein durch einen Magnet diamagnetisch erregtes Wismuthstäbchen beim Herausziehen und Hineinschieben in eine Drahtspirale Inductionsströme hervorruft, welche denen entgegengesetzt sind, die unter gleichen Umständen durch ein Eisenstäbchen entstehen würden. Dass diese Inductionsströme nicht solche waren, wie sie durch Einfluss von Magneten auf bewegte Leiter im Allgemeinen entstehen, wurde durch einen Gegenversuch mit einem gleich grossen Kupferstäbchen erwiesen, welches, obwohl besser leitend, doch keine merkliche Wirkung hervorrief.

Die bisher mitgetheilten Thatsachen ergaben eine Analogie mit den magnetischen Erscheinungen, nur unterscheiden sie sich durch das Zeichen der Polarität und durch die auffallend geringere Intensität der diamagnetischen Polarität. W. Weber schloss aus den erregten Inductionsströmen, dass die durch gleiche erregende Kraft entwickelten Magnetismen in gleichen Massen Eisen und Wismuth sich verhalten wie 2 540 000 zu 1. Das heisst, der Paramagnetismus des Eisens ist bei gleicher Erregung über $2^1/_2$ Millionen mal grösser als der Diamagnetismus des Wismuths.

Während ferner die Magnetisirung des Eisens bald eine Grenze erreicht, über welche hinaus keine Verstärkung mehr möglich ist, scheint beim Diamagnetismus eine solche Grenze viel langsamer und später erreicht zu werden.

Ein Hauptunterschied in dem Verhalten paramagnetischer und diamagnetischer Körper aber liegt in dem Umstande, dass es wohl remanenten Paramagnetismus, also permanente Magnete giebt, aber keinen remanenten Diamagnetismus, also auch keine permanente Dia-

*) W. Weber, Elektrodyn. Maassbest. III.

**) Phil. Trans. 1856, S. 237.

***) Poggend. Ann. LXXIII, S. 241.

magnete zu geben scheint. Man beobachtet an Wismuthstäbchen auch nach stärkster Erregung keine bleibende Polarität, also auch keine gegenseitige Anziehung und Abstossung von Polen wie bei Magnetnadeln. Dabei bleibt es dahingestellt, ob diese bleibende Polarität überhaupt gar nicht vorhanden oder nur zu schwach ist, um beobachtet zu werden *).

261 **Theorie des Diamagnetismus.** Im Eingange des vorausgehenden Paragraphen haben wir erwähnt, dass bereits Faraday die diamagnetischen Erscheinungen auf Molecularströme zurückzuführen versuchte, welche den Ampère'schen Molecularströmen der Magnete entgegengesetzt sind. W. Weber hat diese Theorie weiter ausgebildet. Wir wollen ihren Hauptgedanken auseinandersetzen.

Nähert man einem Magnetpol einen Leiter, so werden in demselben nach den bekannten Gesetzen der Induction Ströme gebildet, welche den Ampère'schen Strömen des Magnets entgegengesetzt sind; wird z. B. ein Kupferstäbchen dem Nordpol eines Magnets genähert, so wird das dem Magnet zugekehrte Ende des Kupferstückes durch diese inducirten Ströme, wenn auch nur vorübergehend, selbst zu einem Nordpol.

Durch Annäherung gegen einen Magnetpol wird also ein Wismuthstab durch Induction in einen polaren Zustand versetzt, welcher demjenigen ganz gleich ist, welchen wir zur Erklärung der diamagnetischen Erscheinungen annehmen müssen. Bekanntlich sind aber die Ströme, welche in der Masse eines Leiters inducirt werden, wenn er einem Magnetpole genähert wird, nur vorübergehend, sie verschwinden alsbald, wenn der Leiter ruhig in seiner Stellung gegen den Magnet verbleibt; um also die Erscheinungen des Magnetismus zu erklären, kommt es darauf an, zu zeigen, wie es möglich ist, dass dieser bei der Annäherung gegen den Magnetpol hervorgerufene Zustand ein bleibender sein kann, so lange sich der Leiter dem Magnetpol gegenüber befindet.

Wäre in dem Wismuth jedes Wismuthmolecül schon von einem continuirlichen Strome umkreist, wie wir uns die Ampère'schen Ströme um die Eisenmolecüle denken, so könnte die Einwirkung eines Magnetpols durchaus keine andere Wirkung hervorbringen, als wie beim Eisen auch, er müsste die schon vorhandenen Molecularströme denen des einwirkenden Magnetpols parallel stellen, kurz, auf schon vorhandene, durch den Magnet erst zu richtende Molecularströme lassen sich die Erscheinungen des Diamagnetismus nicht zurückführen.

Die Ströme, welche dem diamagnetischen Körper seine Polarität ertheilen, müssen also erst bei der Annäherung gegen einen Magnetpol, oder dadurch, dass der Magnetismus in demselben entsteht, gebildet werden; sie dürfen aber nicht vorübergehend sein, wie die gewöhnlichen in der Masse von Leitern inducirten Ströme, sondern sie müssen beharrlich

*) Ueber das Verhalten des Bergkrystalls nach den Versuchen von O. Tumlirz siehe §. 263.

sein, sie müssen so lange andauern, als der diamagnetische Körper dem Magnetpole gegenüber bleibt.

Dies ist nun durch die Annahme zu erklären möglich, dass in dem diamagnetischen Körper Molecularströme inducirt werden, d. h. Ströme, welche die einzelnen Molecüle des diamagnetischen Körpers umkreisen, sich aber nicht in der Masse desselben, von einem Molecül zum anderen fortschreitend, bewegen.

Der Unterschied zwischen Strömen, welche sich durch Leiter in grösseren Kreisen bewegen, und den Molecularströmen besteht nur darin, dass die strömende Elektricität der ersteren beim Uebergange von einem Molecül zum anderen einen mehr oder minder bedeutenden (Leitungs-) Widerstand zu überwinden hat, wodurch ihre lebendige Kraft so schnell verzehrt, d. h. in Wärme verwandelt wird, dass sie in einer unmessbar kleinen Zeit zur Ruhe gelangen muss, wenn ihr der erlittene Verlust nicht durch fortdauernde elektromotorische Kräfte immer wieder ersetzt wird. Das Gegentheil gilt von den Molecularströmen, welche nicht durch den Leiter von Molecül zu Molecül fortgehen, sondern sich um ein einziges Molecül herum bewegen, für die also jener Grund der Entziehung der lebendigen Kraft wegfällt. Diese Ströme beharren also ohne elektromotorische Kraft in gleicher Intensität *).

Wirkt nun eine inducirende Kraft auf einen Körper, so können dadurch zweierlei Ströme gebildet werden: die gewöhnlichen Inductionsströme, welche sich durch die Masse des Körpers bewegen und alsbald verschwinden, und inducirte Molecularströme, welche auf ihrem Wege um die Molecüle herum keinen Widerstand finden und ungeschwächt fortdauern müssen, bis in Folge einer neuen entgegengesetzten Induction neue entgegengesetzte Molecularströme hinzukommen, welche die älteren aufheben.

Nach der Weber'schen Theorie des Diamagnetismus sind also die hierher gehörigen Erscheinungen durch Molecularströme zu erklären, welche in dem Diamagneticum durch Annäherung gegen einen Magnetpol oder dadurch inducirt werden, dass in einem benachbarten Pole der Magnetismus entsteht, und welche so lange fortdauern, bis das Verschwinden des Magnetismus in dem Magnetpol oder die Entfernung des Diamagneticums von demselben eine entgegengesetzte Induction bewirkt und dadurch die Wirkung der früheren aufhebt.

Die in grösseren Kreisen sich bewegenden Inductionsströme können sich in Isolatoren nicht bilden; inducirte Molecularströme sind aber in ihnen wohl möglich, wie ja auch Nichtleiter, z. B. schweres Glas, von den Magnetpolen abgestossen werden und sich äquatorial stellen.

*) Auch in der kinetischen Gastheorie wird angenommen, dass wohl die lebendige Kraft von Massen in Wärme verwandelt werden kann, nicht aber die lebendige Kraft der einzelnen Molecüle, weil sie selbst das Wesen der Wärme ausmacht.

262 **Diamagnetismus von Flammen und Gasen.** Die früheren Versuche Faraday's über das Verhalten der Gase gegen Magnetpole gaben keine entscheidenden Resultate. — Bancalari fand zuerst, dass eine Flamme, zwischen die Pole eines Elektromagnets gestellt, im Augenblick der Herstellung des Stromes eine Abstossung erleidet und bei Unterbrechung desselben wieder in ihre ursprüngliche Lage zurückkehrt.

Zantedeschi, Faraday und Plücker haben weitere Versuche über den Diamagnetismus der Flamme angestellt. Plücker brachte zwischen die 3,5 mm von einander entfernten Polspitzen eines Elektromagnets eine ruhig brennende, keinen Russ absetzende Talgkerze, und hielt dieselbe so zwischen die Polspitzen, dass sich diese in $^7/_8$ der

Fig. 864.



Fig. 865.



Fig. 866.



Fig. 867.



ursprünglichen Höhe der Flamme befanden. Fig. 864 zeigt für diesen Fall die äquatoriale, Fig. 865 die axiale Ansicht der Flamme.

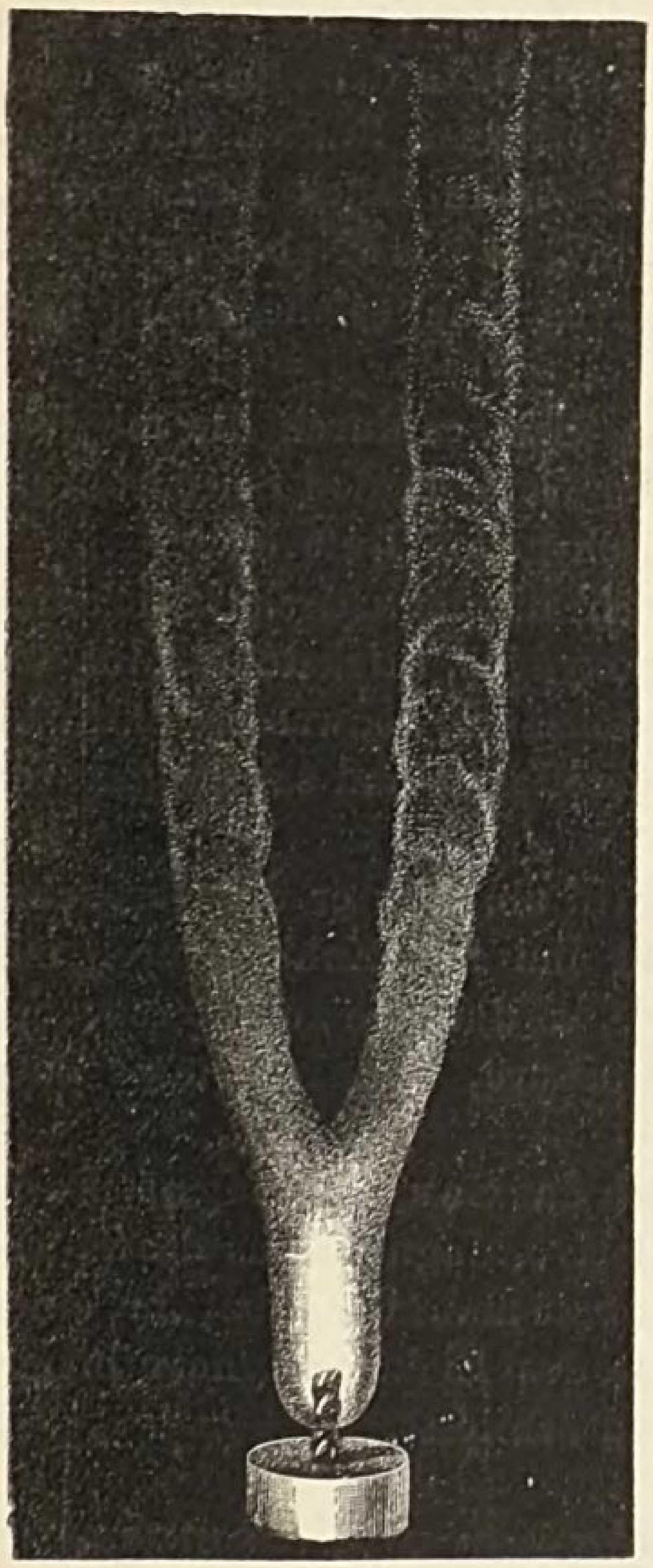
Als die Flamme gehoben wurde, so dass sich die Polspitzen in der Hälfte ihrer ursprünglichen Höhe befanden, nahm die Flamme in äquatorialer Richtung die Gestalt Fig. 866 an.

Endlich wurde die Talgkerze so weit gehoben, dass sich die beiden Polspitzen mit dem oberen Ende des Dochtes in gleicher Höhe befanden und die Flamme, durch die eisernen Polspitzen abgekühlt, nicht mehr mit vollem Lichte brannte. Als die Kette geschlossen wurde, erhielt sie nicht allein ihr früheres Licht wieder, sondern sie brannte noch stärker, indem sie herunter gedrückt wurde und in der Aequatorialansicht die Form Fig. 867 annahm.

Bei diesen Versuchen mit der Talgkerze brannte dieselbe, ohne Russ abzusetzen. Ein stark russendes Talglicht bietet ganz andere Er-

scheinungen dar. Wenn sich insbesondere die beiden Polspitzen in $^3/_4$ der Höhe der ursprünglichen Flamme befanden, so ergab sich beim Schliessen der Kette die in Fig. 868 dargestellte Aequatorialansicht. Der aufsteigende graue Qualm breitete sich in der Aequatorialebene bedeutend aus. Er wurde auswärts scharf von einer Parabel begrenzt, deren Scheitel genau in die Mitte zwischen die beiden Polspitzen fällt.

Fig. 868.



Aehnliches zeigt eine russende Terpentinölflamme, der von einem brennenden Stück Zunder aufsteigende Rauch und so weiter.

Zur Hervorbringung dieser Erscheinungen sind grosse Elektromagnete und bedeutende Stromstärken nöthig.

Alle die verschiedenen Formen, welche die Flammen unter dem Einfluss von Magnetpolen annehmen, erklären sich aus der Annahme, dass die Substanz der Flammen durch die Magnetpole abgestossen wird, und dass diese Abstossung hauptsächlich von der Axenlinie aus nach den Seiten erfolgt; es wird also durch diese Versuche bewiesen, dass die verschiedenen untersuchten Flammen sich diamagnetisch verhalten, und zwar, dass sie in höherem Grade diamagnetisch sind als die umgebende Luft.

Um das Verhalten verschiedener Gasarten bei gleicher Temperatur (der Temperatur der umgebenden Luft) zu prüfen, schlug Faraday folgendes Verfahren ein. Das zu prüfende Gas befand sich in einer Woulf'schen Flasche. In der einen Oeffnung derselben wurde eine fast bis zum Boden der Flasche hinabreichende Röhre befestigt, und durch diese wurde das Wasser eingegossen, welches das Gas austreiben sollte. Der Zufluss des Wassers war so regulirt, dass in der Minute 200 ccm Wasser hier ein-, also ebenso viel Gas durch die andere Oeffnung ausströmte. Das Gas wurde durch eine Glasröhre zu der Stelle geleitet, an welcher es ausströmen sollte. Die Ausströmungsöffnung hatte ungefähr 3 mm Durchmesser; sie befand sich unter den Polspitzen, wenn man mit einem leichteren, über den Polspitzen, wenn man mit einem schwereren Gas experimentirte, so dass ein in der Mitte zwischen den Polspitzen aufsteigender oder niedersinkender Gasstrom hervorgebracht wurde.

In der Ausströmungsröhre befand sich ein Stück Fliesspapier, welches mit concentrirter Salzsäure befeuchtet war, so dass das ausströmende Gas stets etwas Salzsäure mit sich führte. Um nun den Weg zu zeigen, welchen die aufsteigende oder niedersinkende Gassäule nimmt, verfuhr Faraday in folgender Weise: Ueber oder unter dem Mittelpunkte der Linie, welche die beiden Polspitzen verbindet, war eine an beiden Enden offene Glasröhre, so lang und so dick wie ein Finger, angebracht; eine gleiche Röhre in äquatorialer Richtung auf jeder Seite derselben, so also, dass die Ebene, welche die Axen dieser drei verticalen Röhren verbindet, äquatorial steht. Jede dieser Röhren enthielt ein Stück Fliesspapier, welches in Ammoniakflüssigkeit getaucht war, so dass Nebel entstehen mussten, wenn das salzsäurehaltige Gas durch eine solche Röhre hindurchging.

Strömte das Gas frei auf oder ab, so ging es durch die mittlere Röhre; erschien es aber nach Schliessung der Kette in den Seitenröhren, so war das ein Zeichen, dass es diamagnetisch gegen Luft ist.

In dieser Weise geprüft, zeigten sich diamagnetisch: Stickstoff (schwach), Wasserstoff, Kohlensäure, Kohlenoxydgas, Stickstoffoxydul, ölbildendes Gas, Steinkohlengas, Chlorwasserstoffsäure, Jodwasserstoffsäure, Ammoniak, Chlor, Jod, Brom, Cyan. — Stickstoffoxyd und salpetrigsaures Gas gaben keine entscheidenden Resultate.

Faraday änderte nun den Versuch dahin ab, dass er den Versuchsraum gegen die äussere Luft absperrte und ihn mit Kohlensäure, mit Steinkohlengas oder mit Wasserstoffgas füllte, so dass die zu untersuchenden Gase nicht in Luft, sondern in Kohlensäure, Steinkohlengas oder Wasserstoffgas ausströmten.

Auf diese Weise untersucht, verhielt sich das Sauerstoffgas magnetisch gegen alle anderen Gase. Der relative Magnetismus des Sauerstoffgases lässt sich sehr schön zeigen, wenn man dasselbe, in einer Seifenblase enthalten, zwischen die Pole des Elektromagnets bringt und dann den Strom abwechselnd öffnet und schliesst.

263 **Intensitätsbestimmung magnetischer und diamagnetischer Kräfte.** Es wurde oben in §. 260 darauf hingewiesen, dass die diamagnetischen Kräfte im Allgemeinen viel geringfügiger seien, als die unter gleichen Umständen hervorgerufenen magnetischen Kräfte. Aber auch die magnetische Kraft des metallischen Eisens wird durch seinen Eintritt in chemische Verbindungen sehr geschwächt.

Die Grösse der Anziehung, welche magnetische Flüssigkeiten durch Magnetpole erfahren, hat Plücker in folgender Weise gemessen: Zur Aufnahme der Flüssigkeit dient ein Uhrglas mit abgeschliffenem Rande; es wird bis über diesen Rand mit der Flüssigkeit gefüllt und dann dieselbe mit einem als Deckel dienenden matten Glase abgestrichen, so dass man sicher ist, dass die eingeschlossene Flüssigkeit bei gleicher Form stets dasselbe Volumen einnimmt.

Um die Stärke der Anziehung zu bestimmen, wird das Uhrglas mit seinem Inhalte und seinem Deckel in einen dünnen Ring von Messing gebracht, der an drei etwa 200 mm langen Seidenfäden an einer Wage hängt, welche hinreichend fein ist, um 1 mg anzugeben, und an der, ausser der Axe des Wagbalkens, kein Eisen sich befindet. Um die Wirkung bei schwachen Kräften zu verstärken, wird das Glas nicht mit einem einzelnen Pole in Berührung gebracht, sondern es werden die beiden Halbanker so auf die Pole gelegt, dass die einander zugekehrten Enden derselben noch 6 mm von einander abstehen; die Wage wurde genau so adjustirt, dass das Uhrglas mit dem Ringe, wenn die Wage tarirt ist, gleichzeitig jeden der beiden Halbanker eben berührt. Nach Erregung des Magnetismus wird das Uhrglas mit seinem Inhalt angezogen, und um es von den Halbankern abzureissen, wird auf die Wagschale der anderen Seite ein passendes Taragewicht aufgelegt. Die Grösse dieses Gewichtes ist das Maass für die jedesmalige magnetische Kraft.

Das leere Uhrglas selbst nebst dem Messingringe zeigte sich magnetisch; als der Elektromagnet durch sechs Platinelemente erregt wurde, ward es noch mit einer Kraft von 0,4 g angezogen.

Als das Uhrglas mit Wasser gefüllt wurde, betrug die Anziehung noch 0,28 g. Die diamagnetische Abstossung des im Uhrglase eingeschlossenen Wassers beträgt also 0,12 g.

Nun bereitete Plücker vier Lösungen von Eisenchlorür, deren Salzgehalt sich verhielt wie 8 : 4 : 2 : 1 und bestimmte die zum Abziehen nöthigen Gewichte. Es ergab sich aus diesen Versuchen, dass die Anziehung der Eisenchlorürlösung dem Gehalte an Eisenchlorür proportional ist.

Ganz ähnliche Resultate wurden mit fein gepulvertem Eisen erhalten, welches in frischem Schweineschmalz gleichmässig vertheilt war.

Aehnliche Versuche wurden auch mit anderen eisen- und nickelhaltigen Substanzen gemacht. Die folgende Tabelle enthält einen Theil der so erhaltenen Resultate:

	A	*B*	*C*	*D*
Salpetersaures Eisenoxyd	14,55 g	1,212 g	2,502 g	2,064 g
Salzsaures Eisenoxydul .	16,53	2,825	7,095	2,501
Schmalzmischung 50 : 1	8,225	0,161	82,370	50,740
Eisenoxyd, gepulvert .	14,82	10,377	21,690	2,090
Eisenglanz	33,72	23,604	91,755	3,887
Eisenoxydhydrat	16,50	8,750	13,238	1,513

Die Columne *A* enthält das Gewicht der untersuchten Substanz, unter *B* findet sich das Gewicht des in der untersuchten Masse enthaltenen

Eisens; die mit *C* überschriebene Columne enthält die Grösse der beobachteten magnetischen Anziehung. Dividirt man mit den Zahlen unter *B* in die unter *C* stehenden, so erhält man die Zahlen der letzten Verticalreihe, welche also angiebt, wie gross die Anziehung gewesen sein würde, wenn bei gleichmässiger Vertheilung im Inneren des Uhrglases der Eisengehalt der Substanz gerade 1 g betragen hätte.

Wir sehen daraus, dass bei gleichem Eisengehalt die magnetische Anziehung verschiedener Eisenverbindungen sehr verschieden ist, dass die magnetischen Eigenschaften des Eisens in den meisten seiner Verbindungen ausserordentlich geschwächt erscheinen. Bezeichnen wir die magnetische Anziehung des metallischen Eisens mit 100 000, so ist die Anziehung, welche unter gleichen Umständen die gleiche Menge Eisen in verschiedenen Verbindungen erfährt, die folgende:

Eisen metallisch	100 000
" im Oxyd	714
" im Eisenglanz	761
" im Eisenoxydhydrat	296
" in der Lösung von salpetersaurem Eisenoxyd	410
" in der Lösung von salzsaurem Eisenoxydul	490

Man sieht aus dieser Zusammenstellung, wie sehr die magnetischen Eigenschaften des Eisens abnehmen, wenn dies Metall mit anderen Körpern chemische Verbindungen eingeht. Eine einzige Eisenverbindung zeigt einen starken Magnetismus; bezeichnen wir den Magnetismus des Eisens mit 100 000, so ist der eines gleichen Gewichtes Magneteisenstein 40 227. Es ist dies eine Verbindung von Eisenoxyd mit Eisenoxydul ($FeO + Fe_2O_3$). — Der starke Magnetismus dieser Verbindung rührt höchst wahrscheinlich daher, dass das **Eisenoxydul** in sehr hohem Grade magnetisch ist.

Die Grösse der diamagnetischen Abstossung wurde in der Weise ermittelt, wie es oben für Wasser angegeben wurde. Bezeichnen wir die Stärke des Diamagnetismus des **Wassers** mit 100, so ist bei gleichem Volumen die Stärke der diamagnetischen Abstossung für

Alkohol (0,813)	93
Aether	93
Schwefelkohlenstoff	129
Schwefelsäure	64

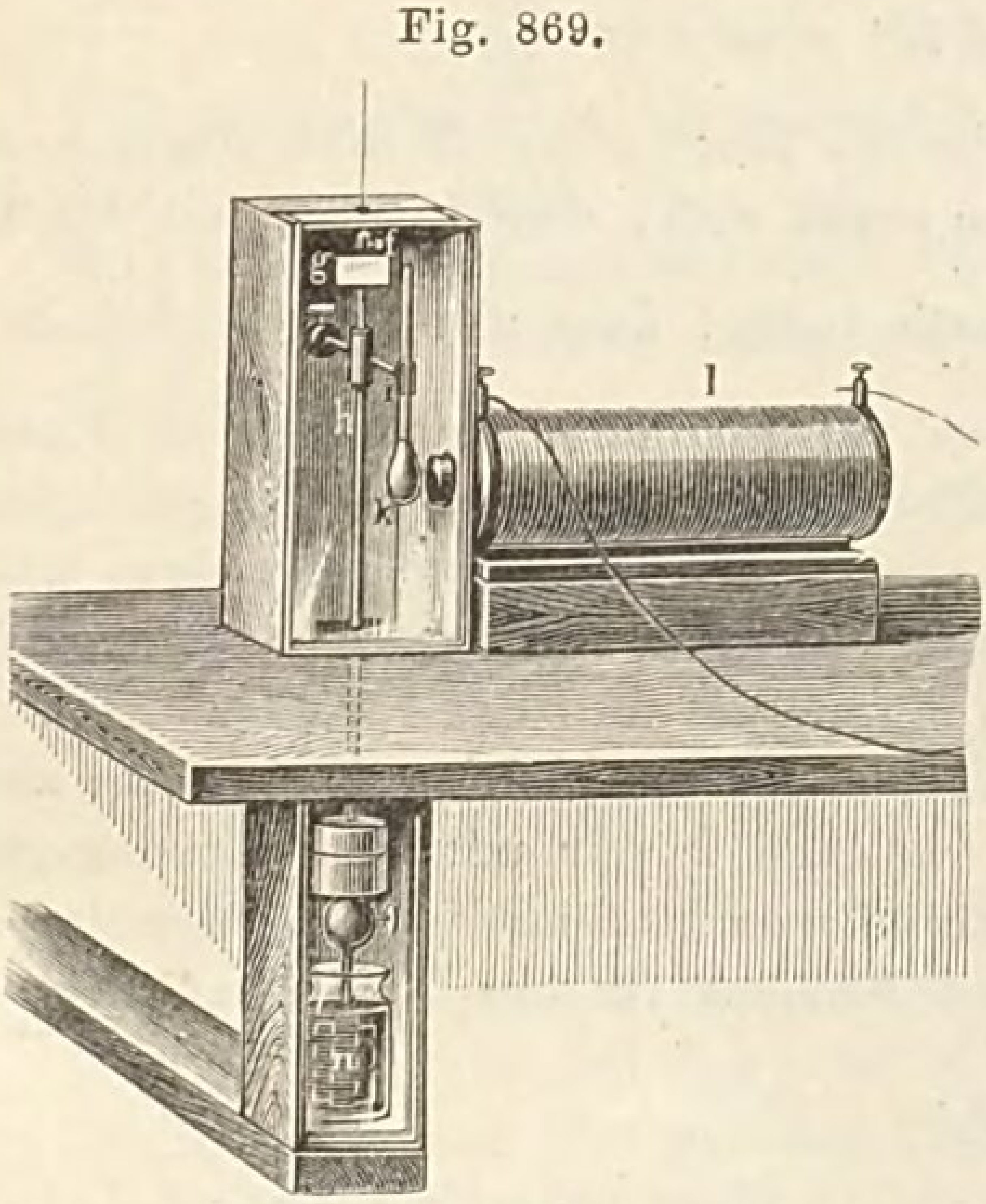
Sehr genaue Versuche hat später G. **Wiedemann** über diesen Gegenstand angestellt*). Zur Messung des magnetischen Momentes der Salze und der Salzlösungen bediente er sich der **Torsion**. An einem

*) Pogg. Ann. CXXVI.

640 mm langen, 0,3 mm dicken, hartgezogenen Neusilberdraht, welcher oben mit einer Torsionsvorrichtung versehen war, hing ein 550 mm langer, 5,5 mm dicker Messingdraht *hh*, Fig. 869. Oben war an diesem Messingdraht ein Spiegel *g*, unterhalb desselben ein Querdraht angebracht, welcher an seinem vorderen Ende das kleine kolbenartige Glasgefäss *k* trug. An seinem untersten Ende waren an dem durch Bleigewichte beschwerten Drahte *h* vier Flügel von Messingblech befestigt, welche in ein Gefäss mit Oel eintauchten, um so die Schwingungen des Apparates rascher zu dämpfen.

Der Draht *hh* sammt allem, was daran hing, schwebte in einem geschlossenen Gehäuse von Holz, welches ihn vor Luftzug schützte. Dem Spiegel *g* gegenüber war die Holzwand durchbrochen und die Oeffnung mit einer Platte von Spiegelglas geschlossen. Seitlich war durch die Wand des Gehäuses das eine Ende eines horizontal liegenden 370 mm langen, 41,5 mm dicken Eisenstabes eingeschoben, dessen in der magnetischen Ost-Westrichtung liegende Axe in ihrer Verlängerung den Mittelpunkt der Glaskugel *k* traf. Der Eisenstab war von einer Magnetisirungsspirale von 1100 Windungen eines ungefähr 2 mm dicken übersponnenen Kupferdrahtes umgeben.

Fig. 869.



Oestlich in der Verlängerung der Axe dieses Elektromagnets, 2,48 m von demselben entfernt, war ein an einem Coconfaden hängender magnetischer Stahlspiegel angebracht, welcher von einer dämpfenden Kupferhülse umgeben war. Sobald der Elektromagnet in Thätigkeit gesetzt wurde, erfolgte eine Ablenkung dieses Stahlspiegels aus seiner Gleichgewichtslage. Die Grösse *M* dieser Ablenkung wurde an einer 900 mm von ihm entfernten Scala mittelst eines Fernrohrs (I) abgelesen und gab ein Maass für das magnetische Moment des Elektromagnets.

Ehe man den Elektromagnet erregte, wurde mittelst eines Fernrohrs (II) das durch den Spiegel *g* entworfene Bild einer 2,87 m von demselben entfernten Scala beobachtet und notirt, welcher Theilstrich gerade am Fadenkreuz einstand. Wurde nun der Elektromagnet erregt, so wurde die Kugel *k* vom Pol des Elektromagnets angezogen, wenn sie einen magnetischen Stoff enthielt, und man musste das obere Ende in entgegengesetzter Richtung drehen, um die Kugel *k* wieder in ihre ur-

sprüngliche Lage zurückzuführen, um also zu bewirken, dass der gleiche Theilstrich wieder am Fadenkreuze des Fernrohrs (II) einstand, wie vorher. — Nachdem dies geschehen war, wurde der Strom unterbrochen, welcher den Elektromagneten umkreiste, die magnetische Wirkung desselben auf k hörte auf, es musste also nun der Messingstab h mit allem, was daran hing, die lediglich durch die Torsion des Neusilberdrahtes bedingte Stellung einnehmen, welche mittelst des Fernrohrs (II) am Scalenbild im Spiegel g beobachtet wurde. Die Differenz dieser beiden Ablesungen giebt ein Maass für die Torsion T des Aufhängedrahtes, welche offenbar der Anziehung zwischen k und dem Magnetpol proportional ist.

Wenn man annehmen kann, dass der in k erregte Magnetismus dem Moment des Elektromagnets proportional sei, so kann man das magnetische Moment M_1 der Kugel k sammt der Salzlösung gleich aM setzen und hat also $T = M \,.\, M_1 = aM^2$ oder $a = \frac{T}{M^2}$

Es wurden nun für verschiedene Werthe von M die entsprechenden Werthe von T ermittelt, und so ergab sich, dass in der That der Quotient $\frac{T}{M^2}$ einen constanten Werth hatte, dass also der im Inhalt der Glaskugel k erregte Magnetismus wirklich dem magnetischen Momente des Elektromagnets proportional war.

Bei diesen Versuchen tritt aber die Wirkung zwischen dem magnetischen Salze und dem Magnetpol nicht rein auf, sondern sie erscheint combinirt mit der Wirkung des Magnetpols auf das Lösungsmittel. Um diese zu eliminiren, stellte Wiedemann in gleicher Weise eine zweite Reihe von Versuchen an, bei welchen k nur mit dem Lösungsmittel gefüllt war. Bezeichnen wir für diesen Fall mit t die Grösse der Torsion, welche dem magnetischen Moment M des Elektromagnets entspricht, so ergiebt sich $b = \frac{t}{M^2}$.

Für den Magnetismus des Salzes allein haben wir also:

$$m = a - b = \frac{T}{M^2} - \frac{t}{M^2}.$$

Um den Einfluss der Concentration der Lösung auf ihr magnetisches Moment zu untersuchen, bestimmte Wiedemann den Werth von m für verschiedene Concentrationsgrade einer wässerigen Lösung von Eisenchlorid und Manganchlorür. Die folgende Tabelle enthält unter g den Gehalt an Metall in 10 ccm der Lösung, in der folgenden die entsprechenden Werthe von m und in der letzten endlich den Quotienten $\frac{m}{g}$.

	g	m	$\frac{m}{g}$
Eisenchlorid	0,595 g	102,74	172,3
	0,450	77,16	170,3
	0,300	50,70	169,0
	0,149	24,72	165,7
Manganchlorür	0,956	163,00	170,5
	0,717	120,30	167,5
	0,478	80,87	170,0
	0,239	40,20	168,2

Der Magnetismus einer Salzlösung ist also ihrem Salzgehalte proportional.

Wiedemann wiederholte diese Versuche mit Lösungen desselben Salzes in verschiedenen Lösungsmitteln.

Er fand für

Eisenchlorid gelöst in	Wasser	Alkohol	Aether
$\frac{m}{g}$	172,3	164,3	170,8

Der Magnetismus des gelösten Salzes ist also von der Natur des Lösungsmittels nahezu unabhängig.

Was den Einfluss der Temperatur anlangt, so fand Wiedemann, dass der Magnetismus der gelösten Salze proportional der Temperatur abnimmt.

In der umstehenden Tabelle sind die Werthe des Quotienten $\frac{m}{g}$, den man als specifischen Magnetismus der Substanz*) bezeichnen kann, für die von Wiedemann untersuchten Salze zusammengestellt.

Die letzte Columne dieser Tabelle enthält das Product μ, welches man durch Multiplication der Werthe von $\frac{m}{g}$ mit dem Atomgewicht des entsprechenden Salzes erhält. Die Vergleichung dieser Werthe ergiebt das wichtige Resultat, dass bei analog zusammengesetzten Salzen desselben Metalles das Product des specifischen Magnetismus desselben mit ihrem Atomgewicht constant ist.

*) Nicht zu verwechseln mit dem S. 118 definirten specifischen Magnetismus von Stahlstäben.

	$\frac{m}{g}$	μ
Schwefelsaures Nickeloxydul	18,40	142
Salpetersaures Nickeloxydul	15,67	143
Nickelchlorür	21,54	140
Schwefelsaures Kobaltoxydul	41,52	322
Salpetersaures Kobaltoxydul	33,98	311
Kobaltchlorür	47,08	306
Schwefelsaures Eisenoxydul	51,36	390
Salpetersaures Eisenoxydul	42,91	386
Eisenchlorür	60,78	386
Schwefelsaures Eisenoxydul-Ammoniak	19,35	379
Schwefelsaures Manganoxydul	62,18	470
Salpetersaures Manganoxydul	52,46	469
Manganchlorür	74,74	470
Schwefelsaures Chromoxyd	19,39	381
Salpetersaures Chromoxyd	15,38	372
Chromchlorid	25,15	399
Schwefelsaures Eisenoxyd	46,51	930
Salpetersaures Eisenoxyd	38,89	941
Eisenchlorid	59,57	966

Dieser Satz erinnert an einen ganz ähnlichen in Betreff der specifischen Wärme der Salze, welchen wir Bd. II, 2 kennen gelernt haben.

In anderer Form lässt sich dieser Satz auch so aussprechen: der durch die magnetisirende Kraft 1 erregte temporäre Magnetismus je eines Atoms der Verbindungen einer bestimmten Oxydationsstufe eines Metalls mit verschiedenen Säuren ist stets derselbe.

Wiedemann untersuchte nun auch den Magnetismus einer Reihe von Salzen in fester Form. Die Salze wurden dabei fein gepulvert und möglichst innig mit geglühter Kieselsäure zusammengerieben in das Glasgefäss des Torsionsapparates gebracht. Diese Versuche führten zu dem Resultate, dass der Magnetismus der Salze in trockenem Zustande nahezu derselbe ist, wie der Magnetismus derselben Salze im gelösten Zustande, und dass die Verbindung der wasserfreien Salze mit Krystallwasser ihren Magnetismus nicht wesentlich ändert.

Wiedemann experimentirte stets mit chemisch reinen Salzen, und wo etwa seine Resultate mit früheren Plücker'schen Angaben nicht

harmoniren, glaubt er, dass der Grund dieser Differenz darin zu suchen sei, dass Plücker nicht immer mit ganz reinen Salzen gearbeitet habe.

Die meisten diamagnetischen Messungen geben nur relative Werthe, welche auf Vergleichung mit dem Verhalten von Eisen oder Wasser beruhen. Boltzmann hat darauf hingewiesen, dass unsere Kenntnisse über den Diamagnetismus durch eine directe, von einer Vergleichung mit dem Eisenmagnetismus unabhängige Bestimmung der Diamagnetisirungsconstanten weit mehr gefördert werden könnten, weil die Messungen am Eisen aus verschiedenen Gründen unter sich nur wenig übereinstimmen.

Man versteht unter der Magnetisirungsconstanten oder Magnetisirungszahl k das auf die Volumeinheit bezogene magnetische Moment, welches durch eine magnetisirende Kraft gleich Eins hervorgerufen wird*). Dabei wird vorausgesetzt, dass die magnetischen Theilchen nicht merklich auf einander wirken, was bei schwach magnetisirten Körpern angenommen werden kann. Die Magnetisirungszahl wurde früher wie alle magnetische Messungen auf das Millimeter-Milligramm-Secundensystem bezogen. Für diamagnetische Körper ist diese Constante, welche dann die Diamagnetisirungszahl**) genannt wird, von negativem Werthe. Die genauesten Messungen dieser Constanten für Wismuth, Antimon und Tellur verdanken wir A. v. Ettingshausen***), welcher sich dabei vier verschiedener Methoden bediente.

Die erste, ursprünglich von Töpler angewandte, beruhte auf den durch die diamagnetische Polarität geweckten Inductionsströmen; die zweite gründete sich auf die Messung der Kraft, mit welcher ein diamagnetischer Körper aus der Mündung einer Stromspirale herausgestossen wird, wobei eine von L. Boltzmann†) berechnete, allerdings sehr complicirte Formel für den Zusammenhang dieser Kraft mit der zu messenden Constanten und den Versuchsbedingungen zu Grunde gelegt wurde.

Bei der dritten Methode wurde der diamagnetische Körper im magnetischen Felde einer Stromspirale bifilar aufgehängt und aus seiner Schwingungsdauer das Drehungsmoment und hieraus die Grösse k abgeleitet. Bei der vierten Methode endlich wurde die Fernwirkung des

*) Für diese Constante wird auch die Bezeichnung: „magnetische Susceptibilität" gebraucht. Quincke hat ausserdem eine Constante $k_1 = \frac{k}{2g}$ eingeführt.

**) Nicht zu verwechseln mit der „Diamagnetisirungsconstante", womit Quincke in Analogie mit der Dielektricitätsconstante die sonst als „magnetische Permeabilität" benannte Grösse $\mu = 1 + 4\pi k$ bezeichnet hat. Wiedem. Ann. 24, S. 348.

***) Wiener Akad. Ber. II, Bd. LXXXV, S. 37 (1882) und Bd. XCVI, S. 777 (1887).

†) Wiener Akad. Ber. 80, S. 695 (1879).

zwischen den Polen eines Magnets aufgehängten diamagnetischen Körpers auf ein Magnetometer beobachtet.

Von diesen vier Methoden ist die zweite bei weitem die genaueste; nach derselben hat A. v. Ettingshausen erhalten:

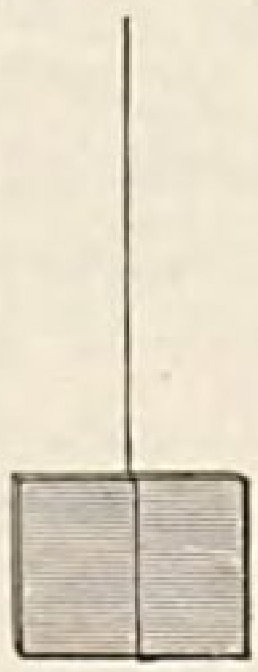
für Wismuth: $k = -\ 13{,}4\ .10^{-6}$ bis $13{,}8\ .10^{-6}$,
für Antimon: $k = -\ 4{,}87\,.10^{-6}$ bis $5{,}58\,.10^{-6}$,
für Tellur: $k = -\ 1{,}59\,.10^{-6}$ bis $1{,}61\,.10^{-6}$.

264 **Einfluss der Krystallisation auf die diamagnetischen Erscheinungen.** Plücker machte zuerst die Beobachtung, dass die Krystallisationsverhältnisse einen wesentlichen Einfluss auf die diamagnetischen Erscheinungen ausüben. Eine Turmalinplatte z. B., welche einer Turmalinzange entnommen, also parallel mit der Axe geschliffen war, wurde so aufgehängt, dass die Richtung der Axe mit der Richtung des Fadens zusammenfiel (es ist dies in Fig. 870 durch die Schraffirung angedeutet; die Schraffirungslinien sind der optischen Axe der Platte parallel). Die Platte stellt sich zwischen den Polen des Elektromagnets axial; der Turmalin ist also eine magnetische Substanz (was wohl von seinem Eisengehalte herrührt). Nun wurde dieselbe Platte so aufgehängt, dass die Richtung der optischen Axe rechtwinklig zu der des Fadens war, wie dies Fig. 871 angedeutet ist; jetzt stellte sich die Platte äquatorial.

Fig. 870.



Fig. 871.



Faraday machte Versuche mit gut krystallisirten Wismuthstücken, aus welchen sich ergab, dass die Hauptspaltungsrichtung stets ein Bestreben zeigt, sich äquatorial zwischen die Magnetpole zu stellen. Dieses Bestreben macht sich in der Weise geltend, dass eine Säule von krystallisirtem Wismuth, deren Axe auf der Hauptspaltungsfläche rechtwinklig steht, sich selbst bei entschieden vorherrschenden Längendimensionen axial stellt.

Faraday nennt die Richtung des krystallisirten Wismuths, welche sich axial zu stellen strebt, die Magnetkrystallaxe.

Plücker liess geschmolzenes Wismuth langsam zwischen den Magnetpolen krystallisiren. Nach dem Erstarren zeigte sich, dass die Ebenen der vollkommenen Spaltbarkeit vorherrschend nach der äquatorialen Richtung lagen.

Nachdem Plücker das eigenthümliche Verhalten der Krystalle zwischen den Magnetpolen entdeckt hatte, suchte er es durch eine Einwirkung der Magnetpole auf die optischen Axen zu erklären. Später hat er seine Ansicht über diesen Gegenstand in folgender Weise modificirt: „Unter der inducirenden Wirkung eines Magnetpols wird jedes kleinste Theilchen eines Krystalls polar magnetisch oder polar diamagnetisch. Aber die Polarität tritt auf, nicht wie bei der gewöhnlichen

Induction, nach einer veränderlichen Richtung, die bloss nach der Lage der Pole bestimmt wird, sondern je nach der Krystallform nach einer oder mehr als einer festen Richtung. Solche Richtungen, die in dem Krystalle durch die Form desselben gegeben sind, habe ich die magnetischen Axen des Krystalls genannt."

Krystalle des regulären Systems haben keine solche magnetische Axe.

Die optisch einaxigen Krystalle haben eine magnetische Axe, welche mit der krystallographischen Hauptaxe (also auch mit der optischen) zusammenfällt. Stellt sich die magnetische Axe zwischen den Magnetpolen axial, so nennt Plücker den Krystall magnetisch positiv; er nennt ihn magnetisch negativ, wenn sich die magnetische Axe zwischen den Magnetpolen äquatorial stellt.

Knoblauch ist dagegen der Ansicht, dass überhaupt in diamagnetischen wie in magnetischen Körpern, deren Theilchen nicht nach allen Seiten hin gleich weit von einander abstehen, die (diamagnetische oder magnetische) Wirkung, welche sich an ihnen zwischen den Magnetpolen kund giebt, immer in der Richtung am stärksten ist, in welcher die materiellen Theilchen am nächsten bei einander liegen.

Für diese Ansicht spricht der folgende Versuch: Wird aus dem feinen Pulver eines rein diamagnetischen Körpers, z. B. aus Mehl, mit Hülfe von etwas Gummiwasser ein vierkantiger Stab gebildet, so stellt sich dieser zwischen den Magnetpolen natürlich so, dass die Längenaxe äquatorial steht. Drückt man ihn in der Richtung seiner grösseren Ausdehnung so weit zusammen, dass das Parallelepiped in einen Würfel übergeht, so stellt sich dieselbe Richtung, welche vorher äquatorial war, auch jetzt noch äquatorial. Dies ist selbst dann noch der Fall, wenn die Zusammendrückung in demselben Sinne wie zuvor so weit fortgesetzt worden, dass aus dem Würfel eine dünne Platte entstanden ist, so dass also die Ebene der Platte axial steht.

Gegen diese auch von Tyndall vertretene Ansicht erhob jedoch G. Wiedemann*) Einwürfe und fand, dass die Versuche dazu nöthigen, eine nach den verschiedenen Richtungen ungleiche Fähigkeit der einzelnen Theile der Krystalle anzunehmen, durch den Einfluss eines Magnets magnetische oder diamagnetische Polarität zu erhalten. Am einfachsten ist die Hypothese von W. Thomson, nach welcher die einzelnen Molecüle eines gepressten oder krystallisirten Körpers im Allgemeinen durch äussere magnetische Kräfte nach drei auf einander senkrechten Richtungen ein ungleich starkes magnetisches oder diamagnetisches Moment erhalten. Die Richtungen wären demnach als magnetische Hauptaxen zu bezeichnen.

Tumlirz**) hat interessante Versuche über das Verhalten des Bergkrystalls im magnetischen Felde mitgetheilt, wodurch die früheren ein-

*) Lehre v. d. Elektricität III, S. 873 u. 887.

**) Wiener Akad. Ber. XCI (1885).

ander widersprechenden Ergebnisse von Plücker, Knoblauch und Tyndall eine Aufklärung und ganz neue Deutung erhielten. Eine senkrecht zur Axe geschnittene Bergkrystallplatte wurde vor dem zugespitzten Pole eines horizontalen Elektromagnets an einem Coconfaden so aufgehängt, dass die Verlängerung des letzteren durch eine Nebenaxe ging und dass die Magnetaxe senkrecht durch die Platte, aber seitwärts von der Aufhängungsaxe hindurchging. Sobald dann der Strom des Elektromagnets geschlossen wurde, erlitt die Platte eine Drehung im Sinne einer Abstossung, welche ebenso eintrat, wenn die Polarität gewechselt oder die rechtsdrehende Platte durch eine linksdrehende ersetzt wurde. Der Krystall zeigte sich also diamagnetisch. Als aber dieselbe Platte zwischen zwei entgegengesetzte Pole, also in ein starkes Magnetfeld, gebracht worden war, zeigte sie sich nachher auf längere Zeit mit dauernder magnetischer Polarität behaftet, deren Richtung nicht bloss in der Hauptaxe, sondern auch in allen anderen darauf senkrechten Richtungen zu erhalten war, wenn man nur die Platte in der betreffenden Richtung den magnetisirenden Kräften unterwarf. Der Bergkrystall ist somit der erste diamagnetische Körper, der eine dauernde Polarität zeigt. Nach einigen Tagen verliert sich die Polarität allmälig wieder und kann neuerdings in derselben oder in anderer Richtung hervorgerufen werden. Tumlirz zeigte dann, dass die Erscheinungen mit einer früher von E. Becquerel (1850) gegebenen Erklärung im Einklange seien, nach welcher alle Körper magnetisch sind und der Diamagnetismus nur durch eine grössere magnetische Polarisationsfähigkeit des umgebenden Mediums zu Stande kommt, so etwa wie in analoger Weise die Steigkraft des Luftballons durch das grössere specifische Gewicht der den Ballon umgebenden Luft.

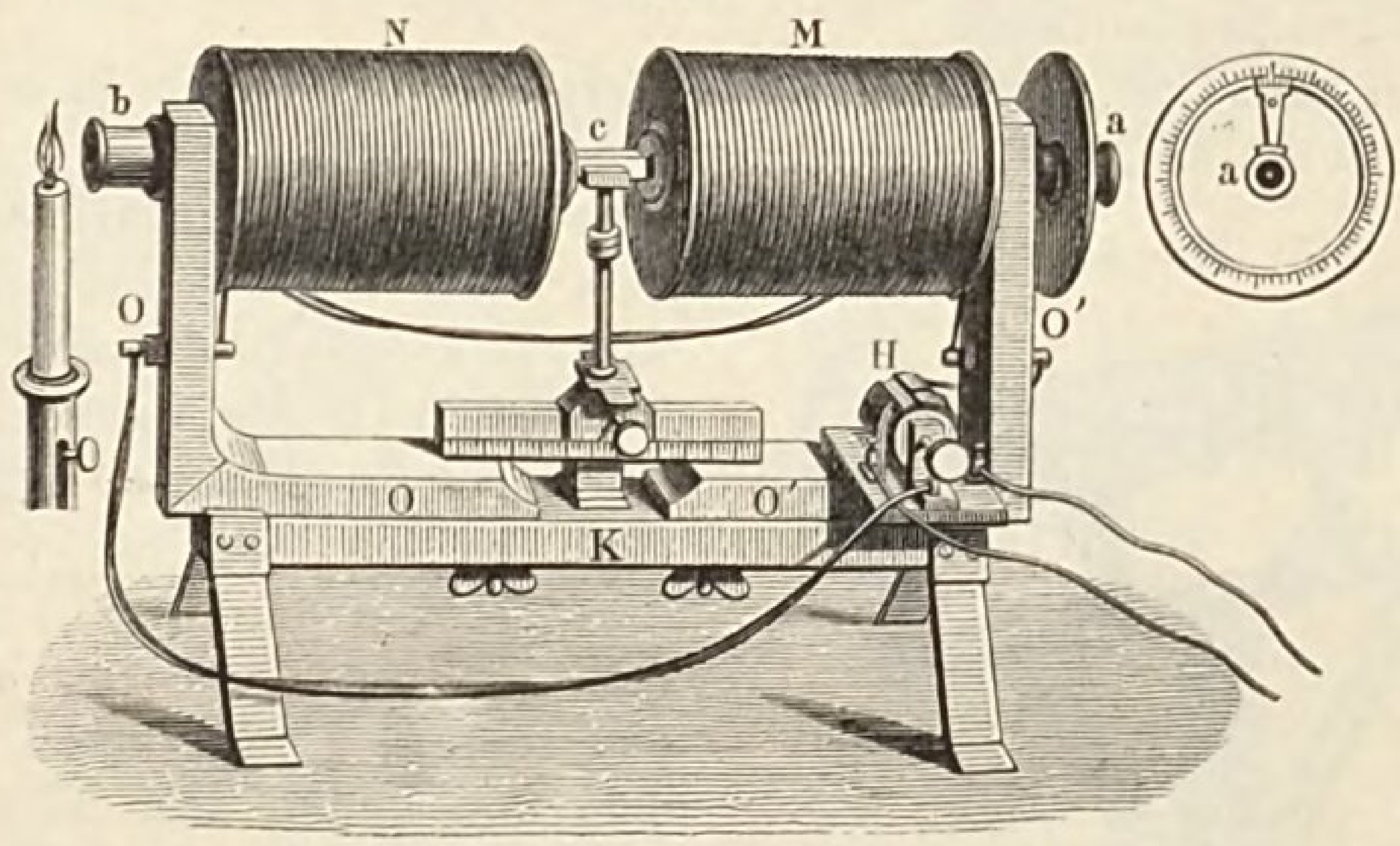
265 **Drehung der Polarisationsebene durch magnetisirende Kräfte.** Als Faraday zwischen die Pole eines kräftigen Elektromagnets ein ungefähr 5 cm langes Stück von kieselborsaurem Bleioxyd (welches er auch kurz nur schweres Glas nennt) brachte, fand er, dass die Polarisationsebene eines durch dieses Glasstück hindurchgesandten linear-polarisirten Lichtstrahls durch den Einfluss der Magnetpole eine Drehung erlitten hatte.

Zur Anstellung dieser Versuche sind die in Fig. 853 und 854, S. 980, 981, abgebildeten Elektromagnete geeignet. Fig. 872 zeigt die Anordnung des Glases zwischen den Polen. Am Ende *a* der Durchbohrung ist das analysirende, am Ende *b* das polarisirende Nicol'sche Prisma angebracht. Der Theilkreis *a* gestattet, den Drehungswinkel zu messen.

Die Windungen der beiden Elektromagnete sind so geführt, dass, wenn ein Strom sie durchläuft, der eine der beiden einander zugekehrten Pole ein Nordpol, der andere ein Südpol wird, dass also ein bei *c* angebrachter durchsichtiger Körper sich zwischen zwei ungleichnamigen Polen befindet.

Wenn ein Stäbchen von schwerem Glase bei *c* aufgestellt ist und die beiden inneren Enden der Eisenkerne möglichst dicht an dasselbe herangerückt sind, werden noch vor Schliessung des Stromes die beiden Nicols gekreuzt, so dass das Gesichtsfeld dunkel erscheint, wenn man durch das Nicol *a*, das Glas *c* und das Nicol *b* nach einem hellen Gegenstande, etwa einer Kerzenflamme, hinsieht. Sobald man aber nun den Strom durch die Windungen des Elektromagnets hindurchgehen lässt, wird das Gesichtsfeld mehr oder weniger erhellt, und man muss das Nicol *a* um eine Anzahl Grade drehen, damit das Gesichtsfeld wieder dunkel wird; die Polarisationsebene ist also gedreht worden, gerade so als ob *c* ein mit Circularpolarisation begabter Körper wäre. *H* ist

Fig. 872



ein Commutator, mittelst dessen man den Strom leicht schliessen, öffnen und umkehren kann.

Ist durch die Einwirkung des Elektromagnets das vorher dunkle Gesichtsfeld hell gemacht worden, so wird es alsbald wieder dunkel, wenn man den Strom unterbricht.

Die Richtung, nach welcher die Polarisationsebene in *c* gedreht wird, ist dieselbe, nach welcher der positive Strom in den Windungen der Elektromagnete *M* und *N* kreist.

Auch an anderen durchsichtigen, festen und flüssigen Körpern wurde eine solche Drehung der Polarisationsebene, wenn auch in geringerem Maasse, beobachtet.

Eine Drehung in dem angegebenen Sinne, nämlich übereinstimmend mit den Ampère'schen Strömen, wird als positive Drehung, die entgegengesetzte als negative bezeichnet.

Um kleine Drehungen der Polarisationsebene merklich zu machen, kann man auch hier die bereits in Bd. II, 1 besprochene doppelte Quarzplatte in Anwendung bringen.

Feste Körper, die man dem Versuche unterwerfen will, werden mit parallelen Flächen versehen, Flüssigkeiten aber zwischen parallelen

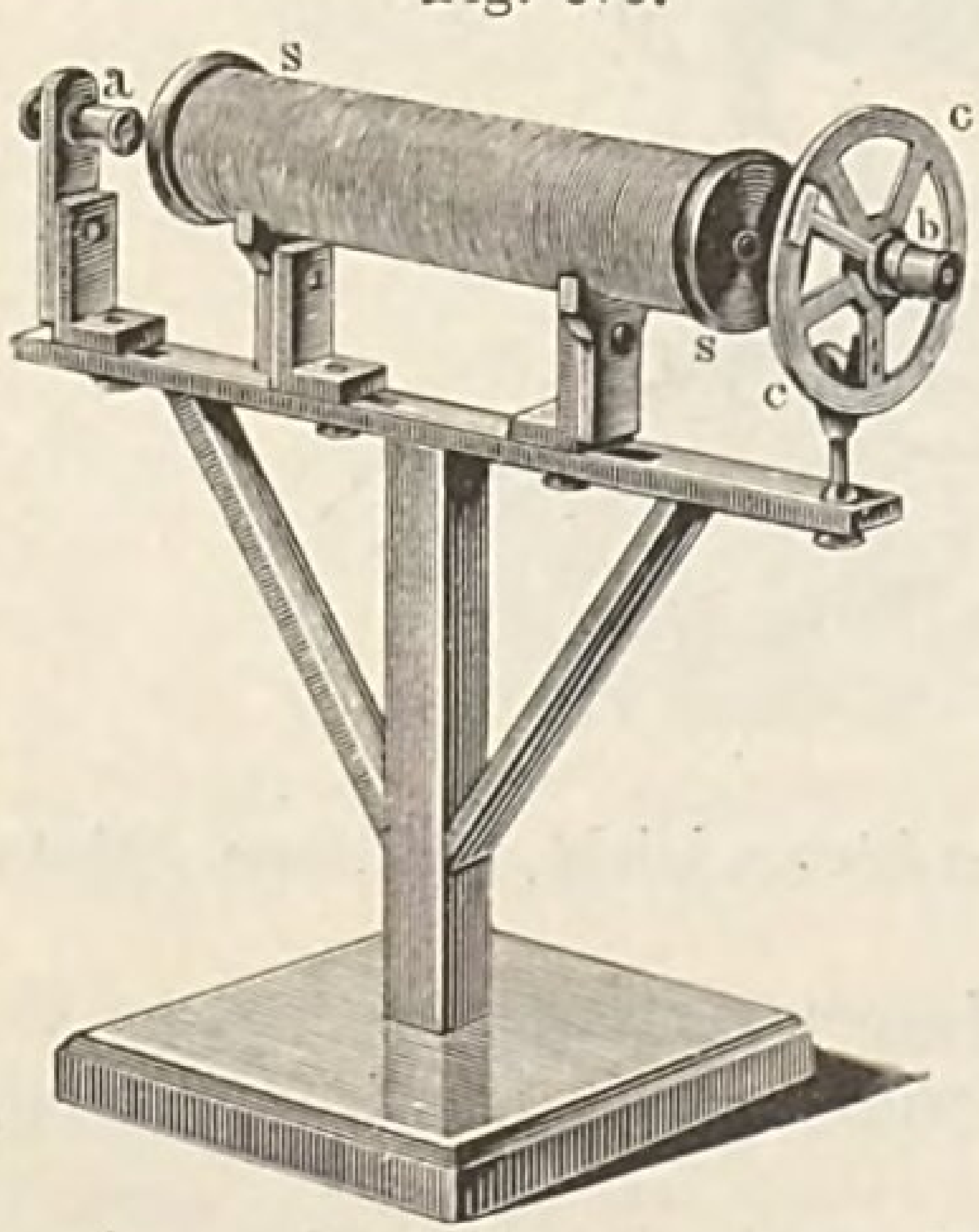
Wänden von dünnem Glase an die entsprechende Stelle des Apparates gebracht.

In einem Langwürfel von schwerem Glase (kiesel-borsaurem Bleioxyd) von 48 mm Länge betrug die mit dem beschriebenen Apparat hervorgebrachte Drehung der Polarisationsebene (für die Strahlen von mittlerer Brechbarkeit) 16°, und zwar bei Anwendung einer Säule von 40 bis 50 mit starker Säure gefüllten Bunsen'schen Bechern.

Da ein kräftiger Elektromagnet in der eben besprochenen Weise die Polarisationsebene in durchsichtigen Körpern zu drehen im Stande ist, so liess sich erwarten, dass ein elektrischer Strom, in Form eines Schraubendrahtes um die durchsichtigen Körper herumgeleitet, ebenfalls eine Drehung der Polarisationsebene bewirken müsse. Faraday fand dies vollkommen bestätigt.

Man kann zur Anstellung dieses Versuches den bereits in der Optik beschriebenen, Fig. 873 perspectivisch dargestellten Apparat anwenden. Eine Röhre, deren Einrichtung bereits Band II, 1 beschrieben wurde, wird mit der entsprechenden Flüssigkeit gefüllt, in die Magnetisirungsspirale *ss* eingeschoben und diese dann so auf das Stativ gelegt, dass die Axe der Spirale mit den Axen der beiden Nicols *a* und *b* eine gerade Linie bildet. Nachdem nun hinter dem Nicol *a* ein heller Gegenstand, etwa eine Kerzenflamme, aufgestellt, und das Nicol *b* so gedreht worden ist, dass das Gesichtsfeld dunkel erscheint, wird der Strom einer Säule von 10 bis 12 grossen Bunsen'schen Bechern durch die Spirale hindurchgesendet, worauf dann das Gesichtsfeld wieder mehr oder weniger erhellt erscheint. Um es wieder dunkel zu machen, muss man das Ocularnicol *b* um einen bestimmten Winkel nach der linken oder rechten Seite drehen.

Fig. 873.



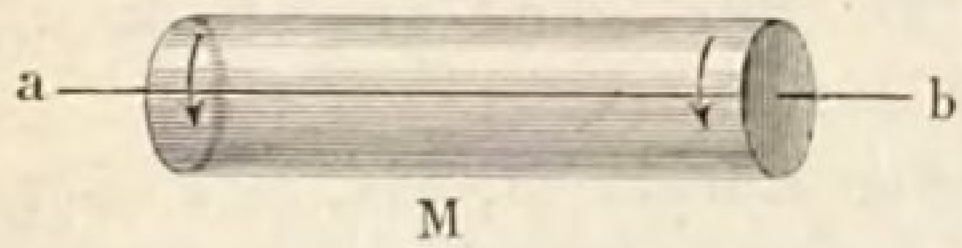
Wie sich nach den mit dem Elektromagnet erhaltenen Resultaten erwarten liess, wird die Polarisationsebene des Strahles nach derselben Richtung gedreht, nach welcher der positive Strom in der Spirale circulirt.

Bringt man Körper, welche schon von Natur ein Drehungsvermögen besitzen, in die Höhlung der Spirale, so addirt oder subtrahirt sich der Effect des elektrischen Stromes zu dem ihrer eigenen Kraft, je nachdem der Strom die Polarisationsebene nach derselben oder nach der entgegengesetzten Richtung dreht, wie die Flüssigkeit selbst.

Zwischen der Drehung der Polarisationsebene durch den elektrischen Strom und der Drehung derselben in einem Körper, welcher die Eigenschaft der Circularpolarisation besitzt, besteht aber ein wesentlicher Unterschied.

In Fig. 874 stelle der Cylinder *M* ein durchsichtiges Diamagneticum dar, welches in der Richtung der Pfeile von elektrischen Strömen umkreist wird, so wird auch die Polarisationsebene eines Strahles, welcher *M* in der Richtung der Axe durchläuft, stets nach der Richtung der Pfeile gedreht. Geht nun der Strahl in der Richtung von *a* nach *b* fort, so beobachtet also ein in *b* befindliches Auge eine Drehung nach der Linken, während, wenn der Strahl sich von *b* nach *a* fortpflanzt, ein in *a* befindliches Auge unter sonst ganz gleichen Umständen eine Drehung nach der Rechten beobachtet. Bei circularpolarisirenden Körpern ist das nicht so. Wäre *M* ein rechtsdrehender circularpolarisirender Körper, so würde man die Polarisationsebene nach der rechten Seite gedreht finden, möchte man nun von *b* nach *a* oder von *a* nach *b* schauen.

Fig. 874.



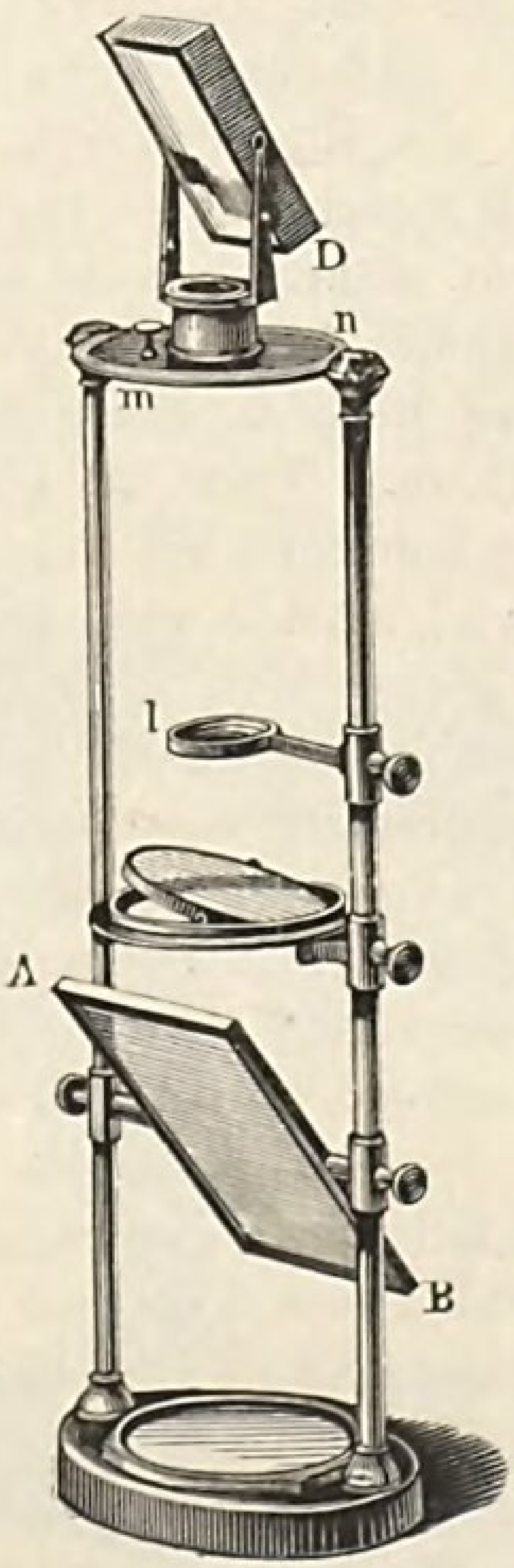
Dringt ein Lichtstrahl in ein circularpolarisirendes Mittel in der Richtung von *b* nach *a* ein, so würde, vorausgesetzt, dass das Mittel ein rechtsdrehendes ist, einem in *a* befindlichen Auge die Polarisationsebene des einfallenden Strahles nach der rechten Seite, also in der Richtung der Pfeile gedreht erscheinen. Wenn aber nun die Endfläche links belegt ist, so dass der sie treffende Strahl reflectirt wird, so wird der reflectirte Strahl eine solche Drehung der Polarisationsebene erleiden, dass sie einem in *b* befindlichen Auge gleichfalls nach der rechten Seite gedreht erscheint, für den reflectirten Strahl findet also eine Drehung der Polarisationsebene in einer der Richtung der Pfeile entgegengesetzten Richtung statt.

Absolut genommen, ist also die Richtung der Drehung der Polarisationsebene in einem circularpolarisirenden Medium vor und nach der Spiegelung eine entgegengesetzte; die Drehung, welche die Polarisationsebene des Strahles vor seiner Reflexion erlitten hat, wird durch die entgegengesetzte Drehung, die er nach seiner Reflexion erleidet, wieder aufgehoben; das Auge in *b* wird also gar keine Drehung der Polarisationsebene an dem Strahl beobachten können, welcher den circularpolarisirenden Körper zweimal in entgegengesetzter Richtung durchlaufen hat.

Legt man eine senkrecht zur Axe geschnittene Quarzplatte auf den mittleren Tisch des Nörremberg'schen Polarisationsapparates, so beobachtet man die schon im ersten Bande beschriebenen Erscheinungen der Circularpolarisation; legt man aber die Quarzplatte auf den belegten Spiegel im Fusse des Polarisationsapparates Fig. 875 (a. f. S.), so tritt der eben besprochene Fall ein; man beobachtet keine Drehung der Polarisationsebene mehr.

Ganz anders verhält es sich, wenn die Drehung der Polarisationsebene durch den elektrischen Strom oder durch einen Elektromagnet hervorgebracht wird. Da in diesem Falle die Drehung der Polarisationsebene nur von der Richtung des Stromes (oder den Ampère'schen Strömen im Elektromagnet) abhängt, da sie absolut dieselbe ist, mögen die Strahlen nach der einen oder nach der anderen Richtung das Diamagneticum durchlaufen, so findet hier keine Aufhebung der Drehung der Polarisationsebene statt, wenn der Strahl an der Rückwand gespiegelt wieder zurückläuft.

Fig. 875.



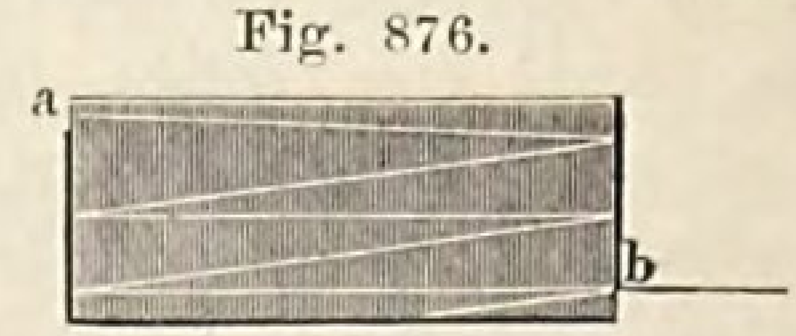
$\frac{1}{5}$ $\frac{1}{6}$

Wenn der Körper *M*, Fig. 874, durch elektrische Ströme die Eigenschaft erhalten hat, die Polarisationsebene zu drehen, so wird ein in *b* befindliches Auge die Polarisationsebene des an der anderen Endfläche reflectirten Strahles doppelt so stark gedreht finden, als wenn der Strahl hier ausgetreten und nach *a* gelangt wäre.

Faraday hat dies benutzt, um die Drehung der Polarisationsebene in einem kurzen Stück eines Diamagneticums sehr merklich zu machen.

Ein Parallelepiped von schwerem Glase, Fig. 876, 7,5 cm lang, dessen

Fig. 876.



Querschnitt ein Quadrat von 14 mm Seite war, wurde an beiden Enden polirt und versilbert. Auf der einen Seite wurde die Belegung bei *a*, auf der anderen Seite wurde sie bei *b* auf etwa 2 mm Breite weggenommen, so dass ein bei *a* etwas schräg eintretender Strahl, nachdem er den Körper mehrmals hin- und hergehend durchlaufen hatte, bei *b* austreten konnte. Hat der Strahl auf diese Weise 5, 7, 9 etc. mal die ganze Länge des Diamagneticums durchlaufen, so ist die Drehung der Polarisationsebene 5, 7, 9 etc. mal so gross, als wenn er nur einmal gerade durchgegangen wäre.

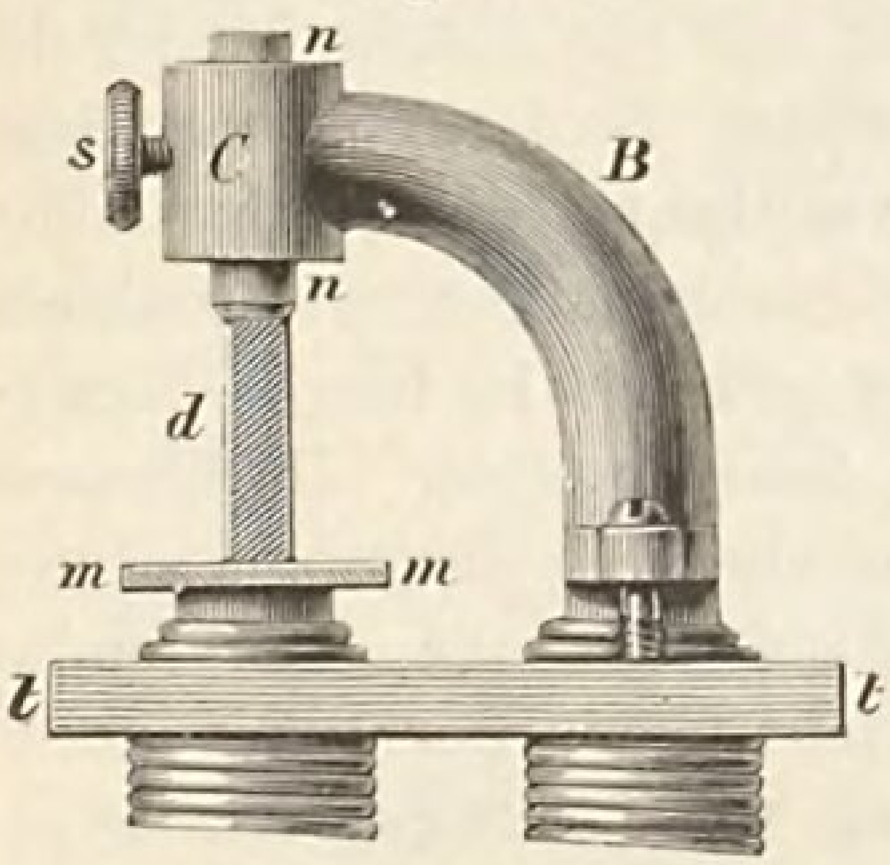
Bertin hat hiervon Anwendung gemacht, um mit Hülfe des Nörremberg'schen Polarisationsapparates die diamagnetische Drehung der Polarisationsebene zu zeigen. Der belegte horizontale Spiegel des Polarisationsapparates, Fig. 875, wurde auf den einen Pol eines aufrecht stehenden Elektromagnets aufgesetzt und dann ein Stück Faraday'schen Glases auf den Spiegel gesetzt. So lange kein Strom durch den Apparat

geht, sieht man das Gesichtsfeld dunkel, wenn die Polarisationsebenen des unteren Polarisationsspiegels und des Zerlegers gekreuzt sind; so wie aber der Strom durch die Drahtwindungen geht, erscheint die Platte hell, und man muss den Zerleger nach der rechten Seite drehen, wenn der Polarisationsapparat auf einem Südpol steht, nach der linken im entgegengesetzten Falle, um wieder ein Minimum von Lichtstärke zu erhalten. Für eine 18 mm dicke Platte Faraday'schen Glases betrug diese Drehung 10°, für eine 48 mm dicke betrug sie 21°.

J. Müller verstärkte die Wirkung beim Bertin'schen Versuche auf folgende Weise:

Auf den einen Pol des Elektromagnets wird ein eiserner Bügel *B* (Fig. 877) aufgesetzt und durch Holzschrauben festgehalten, welche in das Brettchen *t* eingelassen sind. Gerade über der Mitte des andern Poles endigt der Bügel *B* mit einem hohlen Eisencylinder *C*, in welchem ein eisernes Rohr *nn* von wenigstens 4 mm innerer Oeffnung und nahe 4 mm Wanddicke auf- und abgeschoben und mittelst der Schraube *s* an jeder beliebigen Stelle festgestellt werden kann. *nn* wird so gerichtet, dass es genau auf der oberen Fläche des Diamagneticums *d* aufsitzt, welches auf dem belegten Spiegel *mm* des Nörremberg'schen Apparates steht. Mittelst dieser Vorrichtung hat J. Müller bei Anwendung von 20 Bunsen'schen Elementen (5 vierfachen) in einem 5 cm hohen Säulchen von gewöhnlichem Flintglas eine Drehung der Polarisationsebene von 9° bei Umkehrung der Polarität erhalten. Die Dimensionen dieser Vorrichtung hängen natürlich von dem Apparate ab, an welchem sie angebracht werden soll.

Fig. 877.



Gesetze der elektromagnetischen Drehung der Polarisationsebene. Methode zur Messung der Intensität eines Magnetfeldes; Verdet'sche Constante. Die Drehung der Polarisationsebene in Körpern, welche der Einwirkung eines magnetischen Feldes ausgesetzt sind, ist natürlicher Weise von der Intensität dieses Feldes, also auch von der Stärke des Stromes abhängig, welcher dieses Feld hervorbringt. Da letztere leichter zu messen als erstere, so waren die anfänglichen Untersuchungen darauf gerichtet, die Abhängigkeit der Drehung von der Stromstärke zu ermitteln. So fand G. Wiedemann*) für Schwefelkohlenstoff: 266

1. dass die Drehung der Polarisationsebene der Intensität des Stromes proportional ist;

*) Poggend. Ann. Bd. 82.

2. dass die Drehung der Polarisationsebene mit der Brechbarkeit der Strahlen zunimmt; ein bestimmtes Gesetz zwischen der Drehung der Polarisationsebene und der Wellenlänge hat sich jedoch nicht ergeben.

In sofern die Intensität des magnetischen Feldes innerhalb gewisser Grenzen der Stromstärke proportional ist, lässt sich daraus auf die Proportionalität zwischen Drehung und Feldintensität schliessen. Directe Messungen der letzteren Abhängigkeit sind von Verdet*) angestellt worden. Um die Intensität des Magnetfeldes zwischen den Polen eines Elektromagnetes nach absolutem Maasse zu messen, bedient man sich der Methode, dass man eine kleine flache Drahtspirale von bekannter Windungsfläche F_1 (Summe der Flächenräume aller Einzelwindungen), welche in solcher Lage im Magnetfeld aufgestellt ist, dass die Kraftlinien senkrecht auf die Fläche hindurchgehen, rasch durch Drehung um 90^0 oder durch Entfernung aus dem Felde in solche Lage bringt, dass keine Kraftlinien des Feldes mehr hindurchgehen. Der dadurch erzeugte Inductionsstrom bewirkt an einem Spiegelgalvanometer, dessen halbe Schwingungsdauer 10 bis 15 Secunden betragen mag, einen Ausschlag von s_1 Scalentheilen. Durch dasselbe Galvanometer wird sodann der Strom eines in dieselbe Leitung mit eingeschalteten Erdinductors von der Windungsfläche F gesendet und der Ausschlag $2\,s$ beobachtet, welcher eintritt, wenn der Erdinductor aus einer zum Meridian senkrechten Stellung um 180^0 gedreht wird. Einer Drehung um 90^0 würde dann der Ausschlag s entsprechen. Ist nun noch die horizontale Componente des Erdmagnetismus $= T$, die gesuchte Intensität des magnetischen Feldes $= T_1$, so folgt:

$$s_1 : s = F_1\,T_1 : F\,T,$$

woraus sich ergiebt:

$$T_1 = T\,\frac{F\,s_1}{F_1\,s}.$$

Die Windungsflächen werden aus den Dimensionen der Windungen oder nach F. Kohlrausch**) und G. Quincke***) aus dem Drehungsmoment abgeleitet, welches dieselben im Vergleiche mit Normalspiralen bekannter Windungsfläche auf die Nadel eines Magnetometers ausüben. Zu letzterem Behufe stellt man die zu vergleichenden Drahtspiralen, deren Radien r_0 und r_1 sein mögen, parallel dem magnetischen Meridian so auf, dass der Mittelpunkt einer kleinen Magnetnadel auf der Verbindungslinie der Mittelpunkte der Drahtrollen liegt und die Verbindungslinie

*) Ann. de chim. et de phys. (3) vol. 41.

**) Gött. Nachrichten 1882, S. 655.

***) Elektrische Untersuchungen, Wiedem. Ann. 24, S. 347. Wir machen auf diese interessanten und insbesondere im experimentellen Detail sehr lehrreichen Untersuchungen, welche wir wegen Raummangel nicht ausführlicher berücksichtigen können, besonders aufmerksam.

normal zum magnetischen Meridian steht. Hierauf regulirt man die Abstände a_0 und a_1 der Mittelpunkte von der Nadel so, dass ein durch beide hinter einander geschaltete Rollen gesendeter Strom die Nadel nicht ablenkt.

Nach §. 221 ist die magnetische Intensität eines Kreisstroms vom Radius r im Abstande a bei der Stromstärke J gleich:

$$\frac{2\,\pi\,r^2\,J}{(a^2+r^2)^{3/2}}.$$

Bei einer Spirale mit n Windungen tritt an Stelle von $2\,\pi\,r^2$ die Zahl $2\,\pi\,r^2\,n$; hat dieselbe für zwei Spiralen die Werthe F_0 und F_1, sind deren Radien r_0 und r_1 und halten sich dieselben in den Abständen a_0 und a_1 bei gleicher Stromstärke J das Gleichgewicht, so ist:

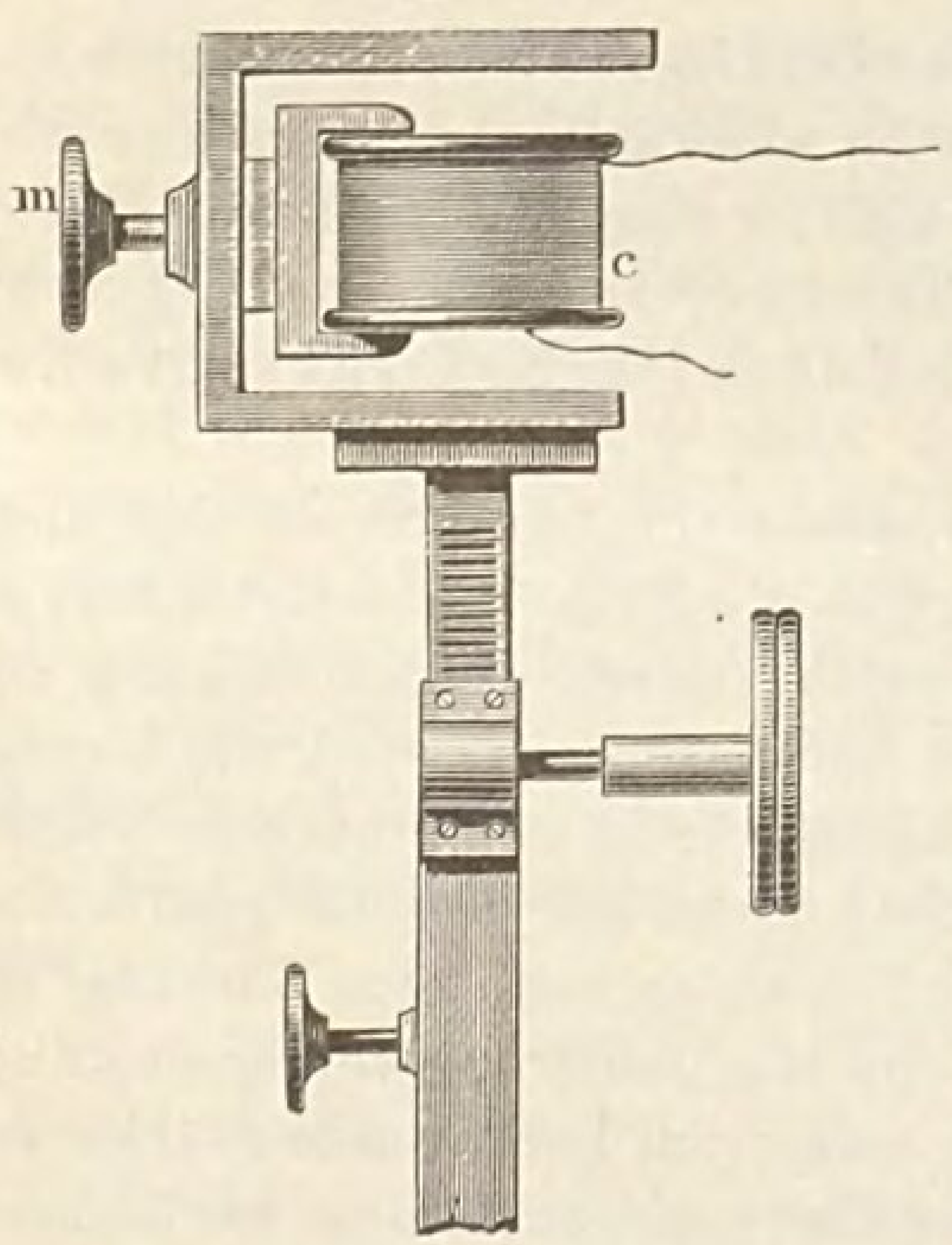
$$\frac{F_0\,J}{(a_0^2+r_0^2)^{3/2}}=\frac{F_1\,J}{(a_1^2+r_1^2)^{3/2}},$$

woraus:

$$F_1=F_0\left[\frac{a_1^2+r_1^2}{a_0^2+r_0^2}\right]^{3/2}.$$

Ist also die Windungsfläche F_0 der Normalspirale bekannt, so erhält man jene der damit zu vergleichenden F_1, ohne dass man die Windungszahl zu kennen und die einzelnen Windungen auszumessen braucht, was oft Schwierigkeiten bereiten würde.

Fig. 878.



Die von Verdet benutzte Vorrichtung ist in Fig. 878 abgebildet. Die kleine Inductionsspirale c wurde an der zu messenden Stelle des Magnetfeldes angebracht, so dass ihre Axe mittelst des Knopfes m parallel oder senkrecht zu den Kraftlinien gestellt werden konnte. Diese Spirale war aus einem 23 m langen, 0,5 mm dicken übersponnenen Kupferdraht gewickelt und hatte eine Höhe von 15 mm und einen äusseren Durchmesser von 28 mm.

Die von G. Quincke angewendeten Spiralen waren aus 0,27 mm dickem Drahte ursprünglich auf cylindrische Glasstäbe gewickelt, dann davon abgezogen, mit Seide zusammengebunden und zwischen dünne Glimmerplatten eingekittet. Sie wurden durch eine hebelartige Vorrichtung aus dem Magnetfelde herausbewegt.

Nachdem Verdet auf solche Weise in den Stand gesetzt war, die Intensitäten des Magnetfeldes zu messen, brachte er einen 40 mm langen

Stab aus Faraday'schem Glase zwischen die Pole und erhielt die nachfolgenden Beobachtungsdaten:

Zahl der verwendeten Bunsen'schen Becher	Abstand der Pole	Magnetisirende Kraft m	Drehung der Polarisationsebene a	$\frac{a}{m}$
20	60	143,4	9^0 13,75′	3,86
20	80	115	7 28,50	3,90
10	60	112,4	7 17,75	3,89
10	90	63,6	3 55,75	3,71

Die nahe stattfindende Constanz des Quotienten $\frac{a}{m}$ beweist, dass die Drehung der Polarisationsebene im Diamagneticum der magnetisirenden Kraft proportional ist, welche auf dasselbe wirkt*).

Die Grösse $\frac{a}{m}$ ist gleichbedeutend mit der Drehung durch die Einheit der magnetischen Kraft.

Diejenige Drehung der Polarisationsebene, welche die Längeneinheit einer Substanz in einem Felde von der absoluten Intensität 1 hervorbringt, wenn die Lichtstrahlen parallel mit den Kraftlinien hindurchgehen, heisst man die Drehungsconstante oder die Verdet'sche Constante der Substanz.

Soll diese Constante wirklich eine solche sein, so darf sie sich nicht mit der Länge der Substanz ändern. Um die Frage zu entscheiden, ob die Drehung der Polarisationsebene, welche durch die Einwirkung von Magnetpolen in einem Diamagneticum hervorgebracht wird, die Summe der Drehungen ist, welche dieselben Magnetpole in den einzelnen Schichten hervorbringen würden, wenn dieselben nicht mit den übrigen in Verbindung ständen, oder ob die einzelnen Schichten noch eine Wirkung auf die benachbarten ausüben, wie dies bei der Magnetisirung von Eisenstäben der Fall ist, brachte Bertin zunächst zwei sich berührende Stücke von Flintglas zwischen die beiden Pole des Elektromagnets und beobachtete die entsprechende Drehung der Polarisationsebene. Alsdann wurde der Reihe nach das erste, und nachdem es wieder an seine alte Stelle ge-

*) Zu denselben Resultaten gelangte H. E. J. G. du Bois, Wiedem. Ann. 35. S. 137 (1888) für sämmtliche einfache Flüssigkeiten, Salzlösungen und Gase. Die Ausnahme bei stark magnetischen Metallen nach den Versuchen von Kundt wird weiter unten besprochen.

bracht worden war, das zweite Stück Flintglas entfernt und die Drehung der Polarisationsebene in dem zurückgebliebenen ermittelt. Folgendes sind einige der von Bertin in dieser Beziehung gemachten Beobachtungen:

Flintgläser		Drehungen bewirkt von den Flintgläsern		Unterschied zwischen der dritten Zahl und der Summe der beiden ersten
		einzeln	zusammen	
Faraday'sches	18,3 mm dick	8° 10′	25° 10′	— 5′
"	38,9	17 5		
Gemeines	38,9	12 15	19 32	+ 12′
"	43,5	7 5		

Die elektromagnetische Drehung der Polarisationsebene in einem Diamagneticum ist demnach gleich der Summe der Drehungen, welche die magnetisirende Kraft unmittelbar in den einzelnen Schichten desselben hervorbringt.

Die Verdet'sche Constante ist also wirklich unabhängig von der Länge. Soll aber die Drehung der Länge thatsächlich proportional sein, so darf die Intensität des magnetischen Feldes sich innerhalb dieser Länge nicht ändern. Dies ist zwischen den Polen eines Ruhmkorff'schen Elektromagnets mit gerade abgeschnittenen Endflächen innerhalb gewisser Grenzen ziemlich nahe der Fall, wie neuerdings J. Stefan*) bewiesen hat. Deshalb fand auch Verdet keinen Unterschied bezüglich der Drehung, als er das Faraday'sche Glas zwischen den Polen hin und her schob, so lange er den Enden der Eisenkerne nicht zu nahe kam. Beobachtet man aber, wie Bertin gethan hat, die Drehung der Polarisationsebene in einem Diamagneticum, welches sich vor einem einzigen Magnetpole befindet, so findet man, dass die Drehung nach dem Gesetze

$$y = A r^x$$

abnimmt, worin y die Drehung, x den Abstand in Millimetern vom Pol, A die Drehung während der Berührung, $A r$ diejenige in 1 mm Abstand bedeuten.

Es ist begreiflich, dass diese Wirkung von der Divergenz der Kraftlinien herrührt, die vom Pole ausgehen. In einem solchen nicht homogenen Felde kann demnach die Drehung nicht proportional der Länge der Substanz sein.

*) Wiener Akad. Ber. XCVII, S. 176 (1888).

Für verschiedene Substanzen ist die Verdet'sche Constante verschieden gross. So fand z. B. Faraday bei gleichen Längen und gleicher magnetisirender Kraft die Drehung der Polarisationsebene in

Schwerem Glas	6^0
Flintglas	2,8
Steinsalz	2,2
Wasser	1

Becquerel fand bei gleicher magnetisirender Kraft die Drehung der Polarisationsebene in einer Schicht von 1 cm Dicke für gesättigte

Lösung von Chlorzink	6^0
„ „ Chlorcalcium	4,5
„ „ Chlornatrium	4,5
„ „ Wasser	3

für Alkohol und Aether war die Drehung noch geringer als für Wasser.

In einer Magnetisirungsspirale erhielt Becquerel bei gleicher Stromstärke und gleicher Länge der Röhre, welche die zu prüfende Flüssigkeit enthielt, folgende Drehungen:

Wasser	10^0
Concentrirte Lösung von Eisenchlorür	3
Schwefelkohlenstoff	29

Kennt man die Verdet'sche Constante für eine Substanz und eine bestimmte Lichtsorte, so kann man aus derselben und der beobachteten Drehung in sehr bequemer Weise die Intensität des magnetischen Feldes in absoluten Einheiten ableiten.

So zum Beispiel beträgt die Verdet'sche Constante für Wasser und Licht der Linie *D* (Natriumlicht) nach Arons 0,01295 Minuten, d. h. eine Wasserschichte von einem Centimeter Dicke dreht unter der magnetischen Intensität 1 (C. Gr. S.) die Polarisationsebene des Natriumlichtes um 0,01295 Minuten. Für Schwefelkohlenstoff ist die Drehung gleich 0,0420 Minuten.

Bringt man also in ein magnetisches Feld einen Trog mit parallelen Glaswänden von 1 cm Abstand und beobachtet man, dass die Drehung, welche durch die Glasplatten allein hervorgebracht wird, nach dem Einbringen des Wassers um $2^0 15' = 135'$ zugenommen hat, so wird man daraus schliessen, dass die magnetische Intensität $= \frac{135}{0{,}01295} = 10417$ Einheiten sei.

Statt des Wassers hat A. Kundt bei den unten mitzutheilenden Versuchen eine Glasplatte von 0,3651 cm Dicke benutzt, deren Verdet'sche Constante für rothes Licht 0,01285' betrug. Der beim Stromwechsel beobachtete doppelte Drehungswinkel betrug daher für diese Glasplatte per Einheit der magnetischen Intensität $2 \times 0{,}00469$ Minuten. Es entsprachen also jedem Grade dieser Drehung 6396 magnetische Einheiten.

Elektromagnetische Drehung der Polarisationsebene durch dünne Metallschichten; Kundt'sche Constante. 267

A. Kundt*) hat die interessante Entdeckung gemacht, dass sehr dünne und deshalb noch durchsichtige Schichten von Eisen, Kobalt und Nickel im magnetischen Felde die Polarisationsebene des durchgehenden Lichtes sehr stark drehen, und zwar fand er, dass diese Drehung beim Eisen für die mittleren Strahlen über 30 000 mal grösser ist als bei Glas gleicher Dicke. Die Drehung ist bei allen diesen Metallen positiv, d. h. im Sinne des Stromes. Die dünnen Metallschichten waren dadurch erhalten worden, dass man auf Spiegelglas, auf welchem eine durchsichtige Platinschichte eingebrannt war, das betreffende Metall aus einer Lösung galvanisch sich abscheiden liess. Die Dicke der Schichte wurde dann durch Wägen eines Stückes von gemessener Oberfläche ermittelt. Die Drehung, welche das Glas allein hervorbringt, wurde an einer entblössten Stelle ebenfalls gemessen und in Abzug gebracht. Es ergab sich, wie bei diesen stark magnetischen Metallen zu erwarten war, dass die Drehung, so wie der inducirte Magnetismus, nicht proportional der magnetisirenden Kraft, sondern (wenigstens beim Eisen) zuerst schneller, dann langsamer wächst, um endlich ein Maximum zu erreichen und dann constant zu bleiben. Für das Eisen verliert daher die Verdet'sche Constante ihre Bedeutung; dafür hat Kundt eine andere Constante eingeführt, nämlich die Maximaldrehung per Längeneinheit, welche wir die Kundt'sche Constante nennen wollen. Als Beleg führen wir einige der Versuche an.

Abhängigkeit der (doppelten) Drehung im Eisen von der magnetischen Intensität:

Drehung in Glas in Graden	Intensität des magnetischen Feldes in (C. Gr. S.)-Einheiten	Drehung im Eisen in Graden
0° 69′	4 420	1° 72′
1° 26′	8 060	3° 47′
2° 20′	14 100	4° 41′
2° 89′	18 500	4° 45′
4° 71′	30 100	4° 36′

Man sieht, wie die Drehung im Eisen von der Intensität 14 100 an nahezu constant bleibt, obwohl die letztere über das Doppelte gesteigert wurde.

Im Mittel aus sechs Versuchen, welche mit Eisenschichten von 0,00000419 bis 0,00002123 Centimeter Dicke angestellt wurden, erhielt

*) Sitzber. d. Berliner Akad. XXXIV, S. 761 (1884); XLVIII, S. 1055 (1885).

Kundt für die einfache Drehung im bis zum Maximum magnetisirten Eisen per Centimeter rund 200 000 Grade.

Für Eisen wurde dabei überdies constatirt, dass das rothe Licht stärker gedreht wird als das blaue, dass also die Drehungsdispersion für dasselbe eine anomale ist.

Nach Kundt lassen sich die sämmtlichen bisher bekannten Thatsachen über die elektromagnetische Drehung der Polarisationsebene beim Durchgang durch isomorphe Substanzen in folgende Punkte zusammenfassen:

I. Alle bisher untersuchten chemisch einfachen Körper, seien sie stark magnetisch oder stark diamagnetisch, zeigen positive Drehung.

So geben positive Drehung die magnetischen Elemente Fe, Co, Ni, Br, P, C (Diamant), O, N, H, sowie die diamagnetischen Elemente S, Se.

II. Negative Drehung geben nur chemisch zusammengesetzte Körper und zwar nur solche, in denen stark magnetische Elemente enthalten sind. So z. B. dreht stark concentrirte Eisenchloridlösung negativ. Die negative Drehung anderer magnetischer Salze giebt sich zu erkennen durch Verminderung der positiven Drehung des Lösungsmittels (Wassers, Methylalkohols).

In naher Beziehung zu den besprochenen Erscheinungen steht eine von Kerr entdeckte, von Kundt weiter verfolgte Beobachtung, dass auch bei der Reflexion an Eisen, Kobalt, Nickel, Glas, welche sich im magnetischen Felde befinden, die Polarisationsebene des Lichtes gedreht wird. Bezüglich der dabei beobachteten Gesetzmässigkeiten und deren Erklärung müssen wir auf die Originalarbeiten verweisen*).

Schliesslich wollen wir noch erwähnen, dass L. Sohncke**) durch Interferenzversuche nachgewiesen hat, dass auch das natürliche Licht beim Durchgang durch ein Faraday'sches Glas unter dem Einflusse eines Magnetfeldes in demselben Sinne gedreht wird, wie das polarisirte Licht.

268 **Thierische Elektricität.** Da einerseits die Inductionsströme vorzugsweise kräftige physiologische Wirkungen hervorbringen und andererseits das Verständniss der physiologischen Wirkungen der Elektricität sowohl als auch der Erscheinungen der thierischen Elektricität die Kenntniss der Inductionserscheinungen voraussetzen, so ist hier der passendste Platz, diese Gegenstände näher zu betrachten.

Die Zuckungserscheinung, welche wir bereits S. 325 kennen gelernt haben, und deren Beobachtung eine neue Aera der Elektricitätslehre eröffnete, ist ein zusammengesetztes Phänomen. Galvani suchte, wie

*) Kundt l. c.

**) Wiedem. Ann. 27, S. 203 (1886).

wir bereits gesehen haben, die Quelle der Elektricitätserregung in dem Froschpräparate selber, während Volta dagegen die Behauptung aufstellte, dass die Zuckung lediglich durch einen elektrischen Strom erzeugt werde, dessen Quelle ausserhalb des Froschpräparates zu suchen sei und als deren Sitz er die Berührungsstelle der heterogenen Metalle bezeichnete, aus welchen der Leitungsbogen zusammengesetzt ist.

Volta's Ansicht errang zunächst den Sieg und allerdings ist es vorzugsweise, wenn auch nicht ausschliesslich, die ausserhalb des Präparates entwickelte Elektricität, welche die Zuckung bei der ursprünglichen Form des Galvani'schen Zuckungsversuches hervorruft. — Wenn das Froschpräparat noch sehr empfindlich ist, so gelingt es allerdings, wie schon Galvani zeigte, auch Zuckungen nicht allein mit gleichartigem Metallbogen, sondern auch ganz ohne Metalle hervorzubringen. Wenn aber die Empfindlichkeit des Präparates so weit abgenommen hat, dass sich unter diesen Umständen keine Zuckungen mehr zeigen, so treten sie bei Anwendung eines aus zwei verschiedenen Metallen zusammengesetzten Schliessungsbogens sogleich wieder ein.

Wenn nun dadurch auch die Ueberlegenheit eines aus heterogenen Metallen gebildeten Schliessungsbogens dargethan ist, so findet doch, wie wir in den folgenden Paragraphen sehen werden, auch in den Muskeln des Froschpräparates selbst eine Elektricitätsentwickelung statt, wenn auch in anderer Weise, als es Galvani sich vorstellte, und diese Elektricitätsentwickelung ist es, welche allein die Zuckung ohne Metalle bewirkt, die wir bald näher werden kennen lernen.

So viel ist aber aus dem Gesagten schon klar, dass das Froschpräparat ein sehr empfindliches Rheoskop ist, welches in vielen Fällen selbst mit dem Multiplicator wetteifert. — Wir haben bereits früher gesehen, dass eine Volta'sche Säule von vielen Plattenpaaren auch in dem lebenden Körper Zuckungen hervorbringen kann, welche denen des galvanischen Froschpräparates entsprechen.

Wenn der Froschschenkel schon unter Umständen zuckt, unter welchen am lebenden Körper auch nicht die leiseste Spur eines Schlages

Fig. 879.



wahrzunehmen ist, so liegt der Grund davon lediglich darin, dass bei dem galvanischen Präparat der Strom in einer ganzen Strecke seiner Bahn auf den Nerven allein angewiesen ist, während er beim lebenden Körper einen Leiter von viel grösserem Querschnitt, die Arme z. B., durchläuft, so dass also nur ein unbedeutender Theil des gesammten Stromes auf die Nerven kommt.

Um das Froschpräparat recht empfindlich zu machen, kommt es darauf an, sich ein möglichst langes Stück des Nerven freiliegend zu verschaffen; dies ist bei dem strompüfenden Froschschenkel der Fall, welcher Fig. 879 (a. v. S.) abgebildet ist. Er besteht aus einem blossen Unterschenkel vom Frosch, an welchem der ganze Verlauf des Nervus ischiadicus von der Kniekehle bis zu den Lendenwirbeln erhalten ist.

Ein stromprüfender Froschschenkel kann also zur Nachweisung schwacher elektrischer Ströme gebraucht werden, welche man durch den Nerven des Präparates gehen lässt; der stromprüfende Schenkel kann also als ein Rheoskop dienen, welches wir von dem magnetischen und dem chemischen als physiologisches Rheoskop unterscheiden wollen.

Die Eigenthümlichkeiten des physiologischen Rheoskops werden wir im folgenden Paragraphen kennen lernen.

269 **Allgemeines Gesetz der Nervenerregung durch den elektrischen Strom.** Schliesst man eine Volta'sche Säule von nicht übermässig vielen Plattenpaaren durch den menschlichen Körper, indem man jeden der Pole der Säule mit einer Hand berührt, so fühlt man einen Schlag; der fortdauernd durch den Körper circulirende Strom bringt kaum eine merkliche Wirkung hervor, während man einen zweiten Schlag empfindet, im Moment, in welchem man die Kette öffnet.

Aehnliches beobachtet man beim stromprüfenden Froschschenkel. Er antwortet nur auf das Eintreten und Aufhören des Stromes oder, allgemeiner ausgedrückt, nur auf die Schwankungen der Stromstärke (Stromdichte), verhält sich aber ruhig während der Dauer eines gleichbleibenden Stromes.

Du Bois-Reymond hat dies 1845 in präciser Fassung als oberstes Gesetz der elektrischen Reizversuche in folgender Weise ausgesprochen:

Nicht der absolute Werth der Stromdichtigkeit in jedem Augenblicke ist es, auf den der Bewegungsnerv mit Zuckung antwortet, sondern die Veränderung dieses Werthes von einem Augenblicke zum anderen, und zwar ist die Anregung zur Bewegung, welche diesen Veränderungen folgt, um so bedeutender, je schneller sie bei gleicher Grösse vor sich gingen oder je grösser sie in der Zeiteinheit waren.

Dadurch erklärt sich nun auch, warum man bei Entladung einer Leydener Flasche einen so heftigen Schlag fühlt. Obgleich die dabei durch den Körper gehende Elektricitätsmenge ausserordentlich gering ist, so ist wegen der grossen Schnelligkeit der Entladung die physiologische Wirkung doch eine sehr bedeutende.

An die Schläge der Leydener Flasche schliessen sich in physiologischer Beziehung zunächst die Wirkungen der Inductionsströme an.

Es muss hier noch bemerkt werden, dass das oben ausgesprochene Gesetz in aller Strenge nur für die Bewegungsnerven gilt. Was die Empfindungsnerven betrifft, so sind sie sämmtlich, so weit sie sich über-

haupt dem elektrischen Strome unterthan zeigen, neben der bei Schwankungen der Dichtigkeitscurve auftretenden Wirkung auch einer Reaction auf die Fortdauer der Strömung in beständiger Grösse fähig.

Schon Volta spricht von einem eigenthümlichen fortdauernden Gefühl, welches man nach dem Schliessen einer Zinksilbersäule von 100 und mehr Plattenpaaren empfindet. Sehr bekannt ist der heftig stechende, brennende Schmerz, den man an verwundeten Hautstellen sogar im Kreise der einfachen Kette verspürt.

Eben so anhaltend ist der elektrische Geschmack.

Was den Gesichtssinn betrifft, so scheint Volta nur den Schliessungs- und Oeffnungsblitz gesehen zu haben; Ritter hat aber schon mittelst der einfachen Kette dauernde Lichtwirkungen beobachtet.

Wenn man den Strom einer Säule von 30 bis 40 Plattenpaaren mittelst Sonden in die Ohren einführt, so beobachtet man ein continuirliches Geräusch etc.

Wenn nun aber in den Empfindungsnerven auch der gleichförmig fortdauernde Strom gefühlt wird, so ist doch selbst bei diesen die Wirkung beim Schliessen und Oeffnen bedeutend stärker als die continuirliche.

So zeigt sich denn eine ziemlich grosse Aehnlichkeit zwischen der Nervenerregung und der Induction, worauf Marianini zuerst aufmerksam gemacht hat.

Der Muskelstrom. Es ist schon bemerkt worden, dass es bereits Galvani gelungen ist, indem er seine Theorie gegen Volta's An- **270**
griffe zu vertheidigen suchte, eine Zuckung ohne Metalle hervorzubringen. Schneidet man nach seiner Angabe an dem Galvani'schen Froschpräparat die Nerven dicht an ihrer Austrittsstelle aus dem Wirbelcanal ab, und bringt man sie, ohne sie in eine Flüssigkeit zu tauchen oder sonst einem verändernden Einfluss auszusetzen, mit der Aussenfläche des Schenkels in Berührung, so zuckt der Schenkel. Auch der folgende Versuch ist bereits von Galvani angestellt worden: wenn man zwei mit Salzlösung gefüllte Gläser neben einander stellt, in das eine die Füsse, in das andere die Wirbelsäule des Galvani'schen Präparates eintaucht, so erfolgt eine Zuckung desselben, sobald man die beiden Gefässe durch befeuchtete Asbest- oder Baumwollendochte leitend verbindet.

Auch Humboldt stellte Versuche an, welche die Elektricitätsentwickelung in den Froschpräparaten unwiderleglich darthun; allein die bald darauf erfolgte Entdeckung der Volta'schen Säule lenkte die Aufmerksamkeit der Naturforscher so sehr von diesen Versuchen ab, dass sie bald ganz in Vergessenheit geriethen.

Erst nach Entdeckung des Elektromagnetismus wurde dieser Gegenstand wieder aufgenommen. Nobili wollte die Empfindlichkeit seines Multiplicators mit der des Froschpräparates vergleichen. Er stellte den letzteren der eben besprochenen Galvani'schen Versuche in der Weise an, dass er in den leitenden Schliessungsbogen, welcher die beiden Ge-

fässe verbinden sollte, den Multiplicator einschaltete. Bei den ersten Versuchen zuckte das Froschpräparat, aber die Nadel des Multiplicators blieb ruhig; das Froschpräparat war also empfindlicher als der Multiplicator.

Nobili stellte einen neuen vollkommeneren Multiplicator her, und nun gelang es ihm, auf die angedeutete Weise einen ersten Ausschlag von 10°, 20°, ja von 30° zu erhalten.

Die Ablenkung des Multiplicators war stets so gerichtet, dass sie einen positiven Strom von den Muskeln zu den Nerven oder von den Füssen zu dem Kopfe im Frosche anzeigte. Diesen Strom, denselben, welcher die Galvani'sche Zuckung ohne Metalle erzeugt, nennt Nobili „*la corrente propria della rana*"; wir nennen ihn Froschstrom.

Der Froschstrom ist nicht bloss im Augenblicke der Schliessung, sondern dauernd vorhanden; in einem einzelnen Falle erhielt Nobili 5° beständiger Ablenkung. — Die Wirkung wird verstärkt, wenn man mehrere Frösche, nach dem Gesetze der Säule geordnet, in den Kreis einführt; zwei Frösche gaben 8°, drei Frösche gaben 11° beständiger Ablenkung. — Das Dasein des Stromes ist von der Fähigkeit des Frosches, mit Zuckung darauf zu antworten, völlig unabhängig, was daraus hervorgeht, dass die Multiplicatorwirkungen mehrere Stunden fortdauern, während die Zuckungen nach höchstens $^1/_4$ Stunde aufhören.

Nobili war der Meinung, dass diese Ströme thermo-elektrischen Ursprunges seien.

Nach Nobili hat zunächst Matteucci die Untersuchungen über die thierische Elektricität fortgesetzt. Er bediente sich zu seinen Versuchen eines Multiplicators von 2500 Windungen. Die Drahtenden dieser Windungen waren mit Platinplatten versehen, welche in zwei mit verdünnter Salzlösung gefüllte Porcellangefässe tauchten. Die Schliessung der Kette geschah dadurch, dass er die beiden Gefässe mittelst des Froschpräparates verband.

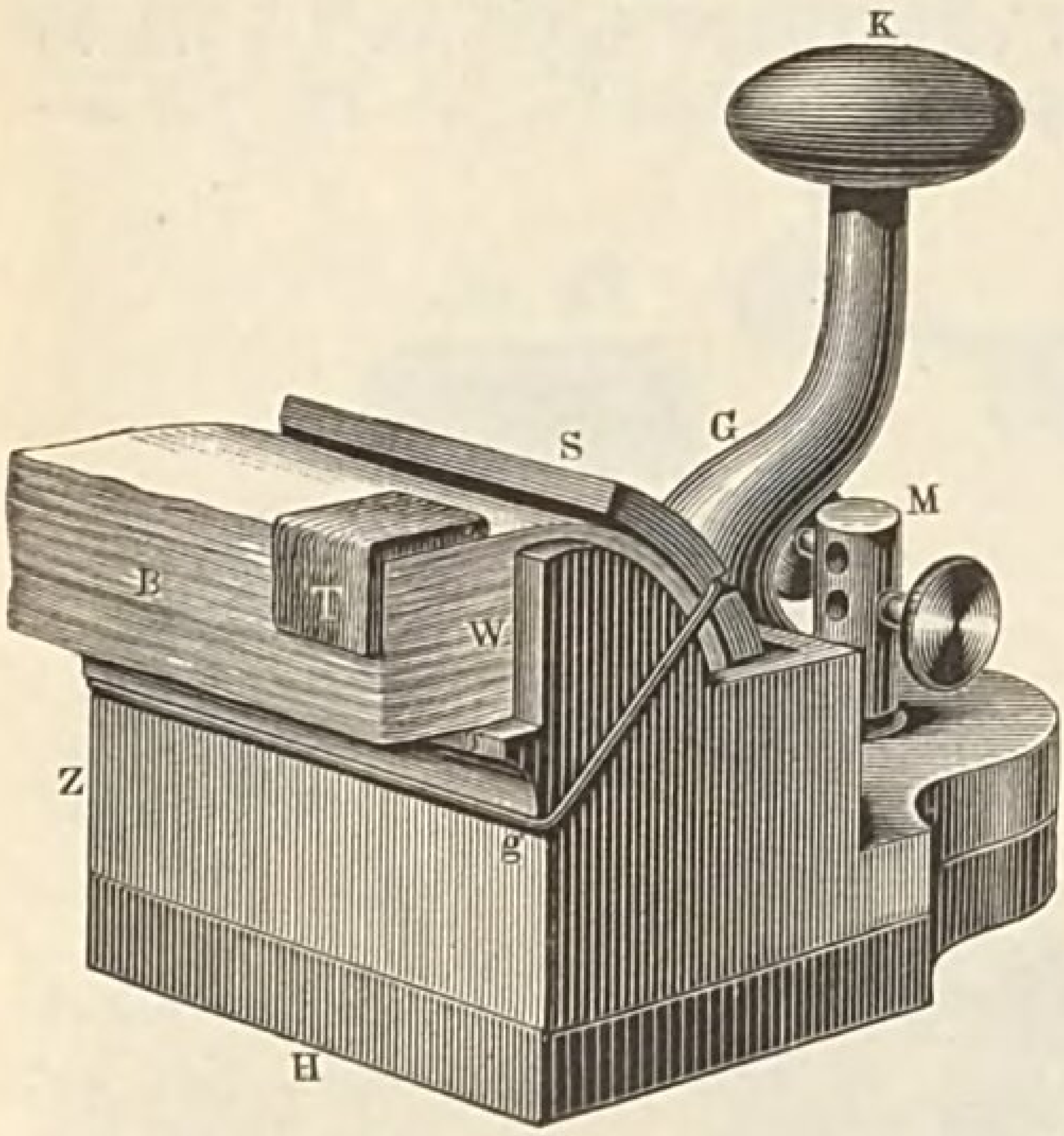
Die wichtigsten Resultate, die er auf diesem Wege erhielt, sind folgende: Man erhält einen Strom, eben so stark wie der des Galvani'schen Präparates, wenn man den ganzen enthäuteten Frosch zum Versuch verwendet und die Füsse in das eine, den Kopf oder Rücken in das andere Gefäss taucht. Mit dem Galvani'schen Präparat erhält man den Strom noch in ungeschwächter Stärke und immer in gleicher Richtung, wenn man, nachdem die Nerven ganz weggeschnitten sind, den Unterschenkel auf der einen, den Oberschenkel auf der anderen Seite eintaucht.

Du Bois-Reymond ging weiter. Er zeigte, dass jeder einzelne Muskel elektromotorisch wirkt, und entwickelte alsbald das Gesetz des Muskelstromes.

Nach den Versuchen von Hermann gilt das von Du Bois entdeckte Gesetz nur für in irgend einer Weise partiell verletzte Muskeln; völlig unverletzte und auch von Fragmenten fremder Muskeln freie Muskeln zeigen nach ihm in der Ruhe keinen Strom.

Zu den Versuchen über den Muskelstrom bedient man sich eines windungsreichen Multiplicators oder, zweckmässiger, eines Spiegelgalvanometers mit astatisirtem und gedämpftem, am besten aperiodisch schwingendem Magnet (§. 171). Die Drähte des Galvanometers werden mit unpolarisirbaren Elektroden (S. 495) in Verbindung gebracht. Du Bois gab letzteren die in Fig. 880 dargestellte Form. Auf einer Bodenplatte aus Hartgummi *H* ist ein aus Zink gegossener parallelepipedischer Trog *Z* befestigt, welcher mit einem vorspringenden Rande *r* und zwei seitlichen Wangenfortsätzen *W*, endlich mit einem angegossenen Bügel *G* versehen ist. Auf letzterem ist ein Knopf *K* aus Hartgummi befestigt, auf welchen beim Arbeiten die Hand aufgelegt werden kann und welcher auch als Handhabe dient. Der Trog ist an der Aussenseite gefirnisst, an der Innenseite amalgamirt und enthält beim Gebrauche eine gesättigte Lösung von Zinkvitriol. In letztere taucht der Zuleitungsbauschen *B*, bestehend aus sehr vielen Lagen feinen Fliesspapiers, welcher auch mit der Zinklösung durchtränkt ist. Dieser Bauschen ruht mit dem nach unten gebogenen Ende auf dem Boden des Zinktroges auf; am Buge wird derselbe durch den Schild *S* aus Hartgummi mit Hülfe des Gummibandes *g* niedergedrückt und festgehalten. Fig. 881 (a. f. S.) zeigt diesen Schild für sich in der Ansicht von rückwärts. *a*, *a'* sind Einschnitte für das Gummiband, *z*, *z* die Wände des Zinktroges. Die Wangen *W*, Fig. 880, verhindern eine seitliche Verschiebung des Bauschens. Die Messingklemme *M* dient zur Einschaltung des Galvanometerdrahtes. Solcher Apparate werden zwei gleiche mit den Bauschen einander gegenüber gestellt und vor Anstellung des Versuchs durch einen dritten ebenfalls mit der Zinklösung durchtränkten Verbindungsbausch, Fig. 882, überbrückt und dadurch leitend verbunden. Sind die beiden Elektroden galvanisch nicht ganz gleich, so zeigt das Galvanometer hierbei einen Strom an, der aber selbst zur Folge hat, dass sich die verschiedenen Polarisationszustände ausgleichen, wobei die Galvanometernadel auf *o* zurückgeht.

Fig. 880.



Um den auf Elektricitätserregung zu prüfenden Körper zwischen die Elektroden einzuschalten, muss man natürlich vorher den Verbindungsbauschen entfernen. Man darf aber die thierischen Theile nicht direct

auf die Zuleitungsbäusche auflegen, da sie sonst von der Zinklösung angeätzt und zu Zuckungen angeregt würden. Um diese Einwirkung zu verhindern, legt man nach Du Bois statt der früher üblichen Eiweisshäutchen an diejenige Stelle des Zuleitungsbauschens, wo die thierischen Theile applicirt werden sollen, eine mehrere Millimeter dicke, mit verdünnter (0,75 bis 2 Proc.) Kochsalzlösung getränkte Platte von Modellirthon auf (Fig. 880 *T*). Der thierische Körper kommt dann auf und zwischen die beiden gegenüberstehenden Thonplatten zu liegen.

Legt man z. B. auf die so vorbereiteten Elektroden den grossen Wadenmuskel (Musculus gastrocnemius) des Frosches, wie Fig. 883 an-

Fig. 881.



Fig. 882.

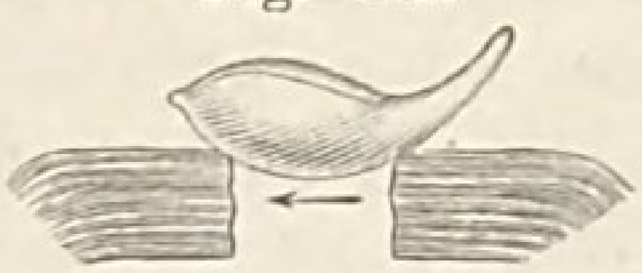
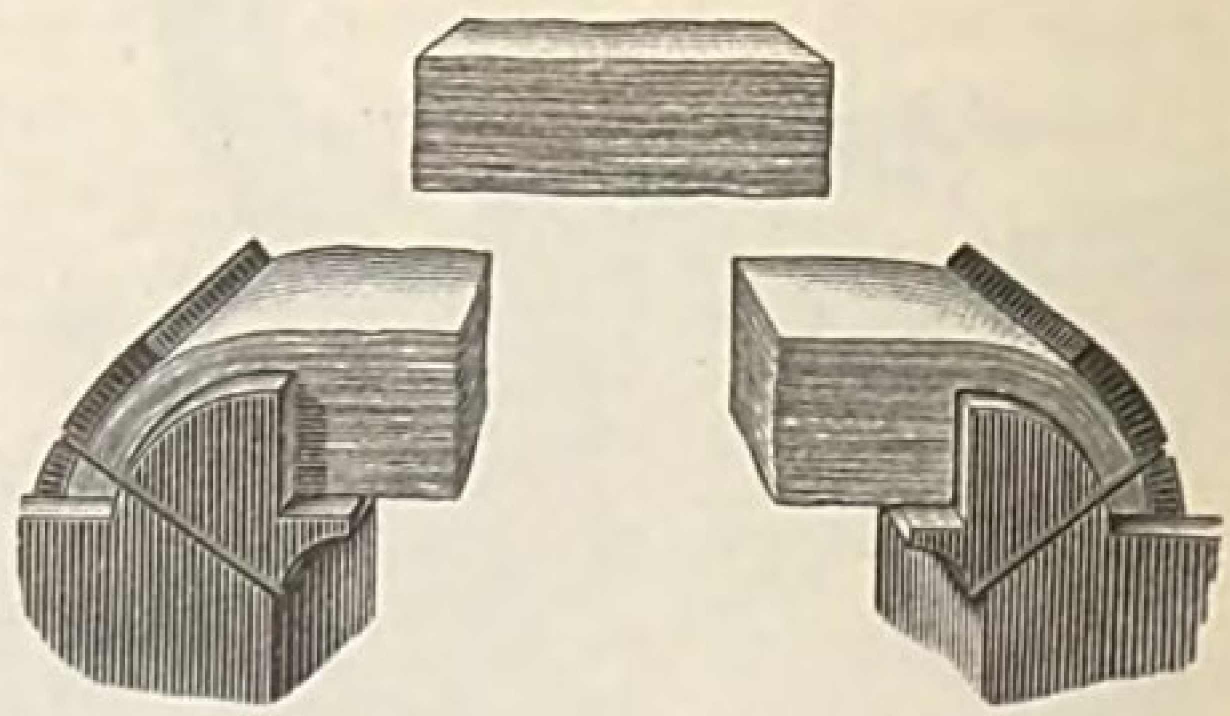


Fig. 883.



deutet, so erfolgt ein bedeutender Ausschlag der Galvanometernadel. Lässt man den Muskel ruhig liegen, so bekommt die Nadel eine beständige Ablenkung, welche etwas geringer ist, als der erste Ausschlag.

Die Grösse der elektromotorischen Kraft des Muskelstromes an regelmässig gefaserten Froschmuskeln beträgt in ihrem nach aussen

Fig. 884.

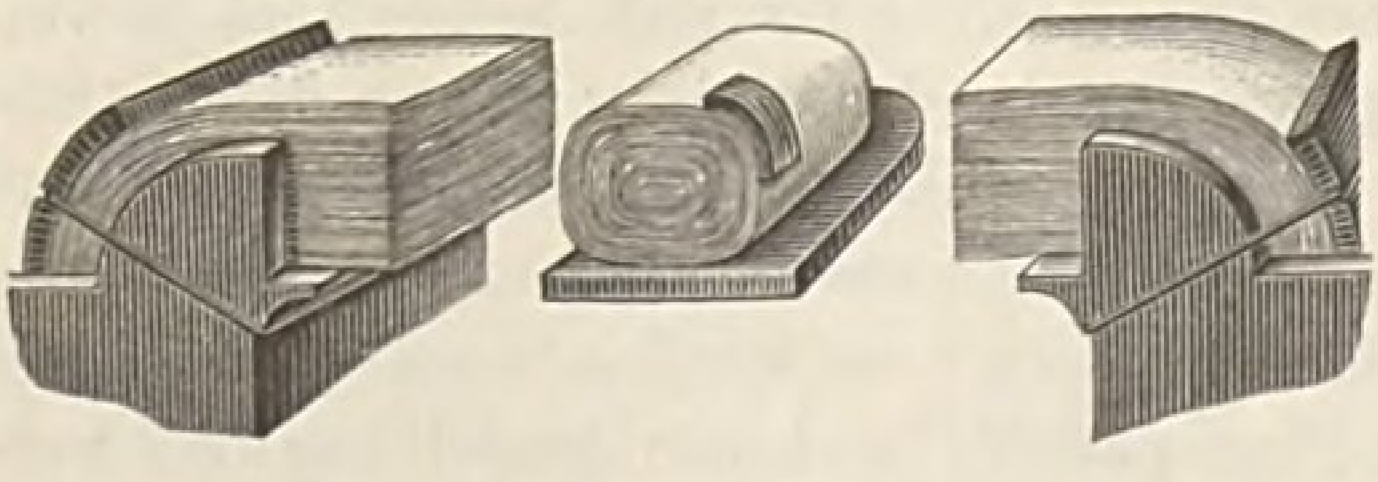
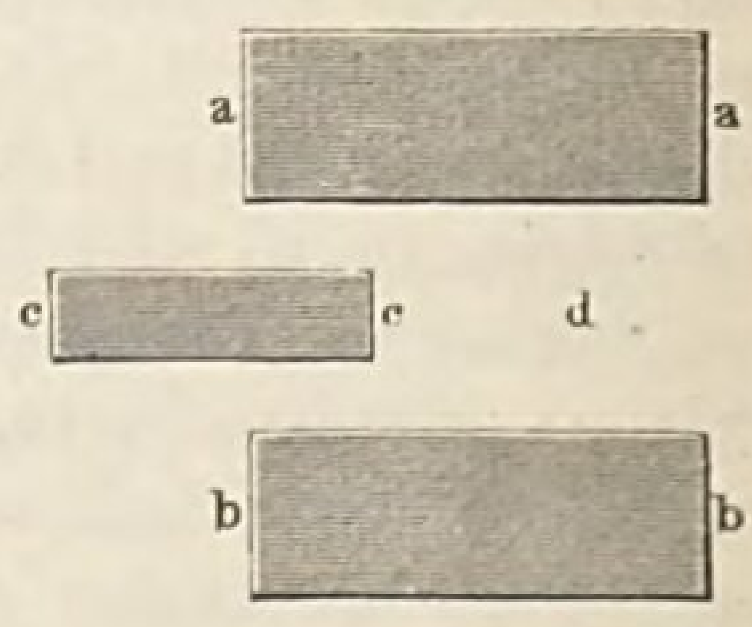


Fig. 885.



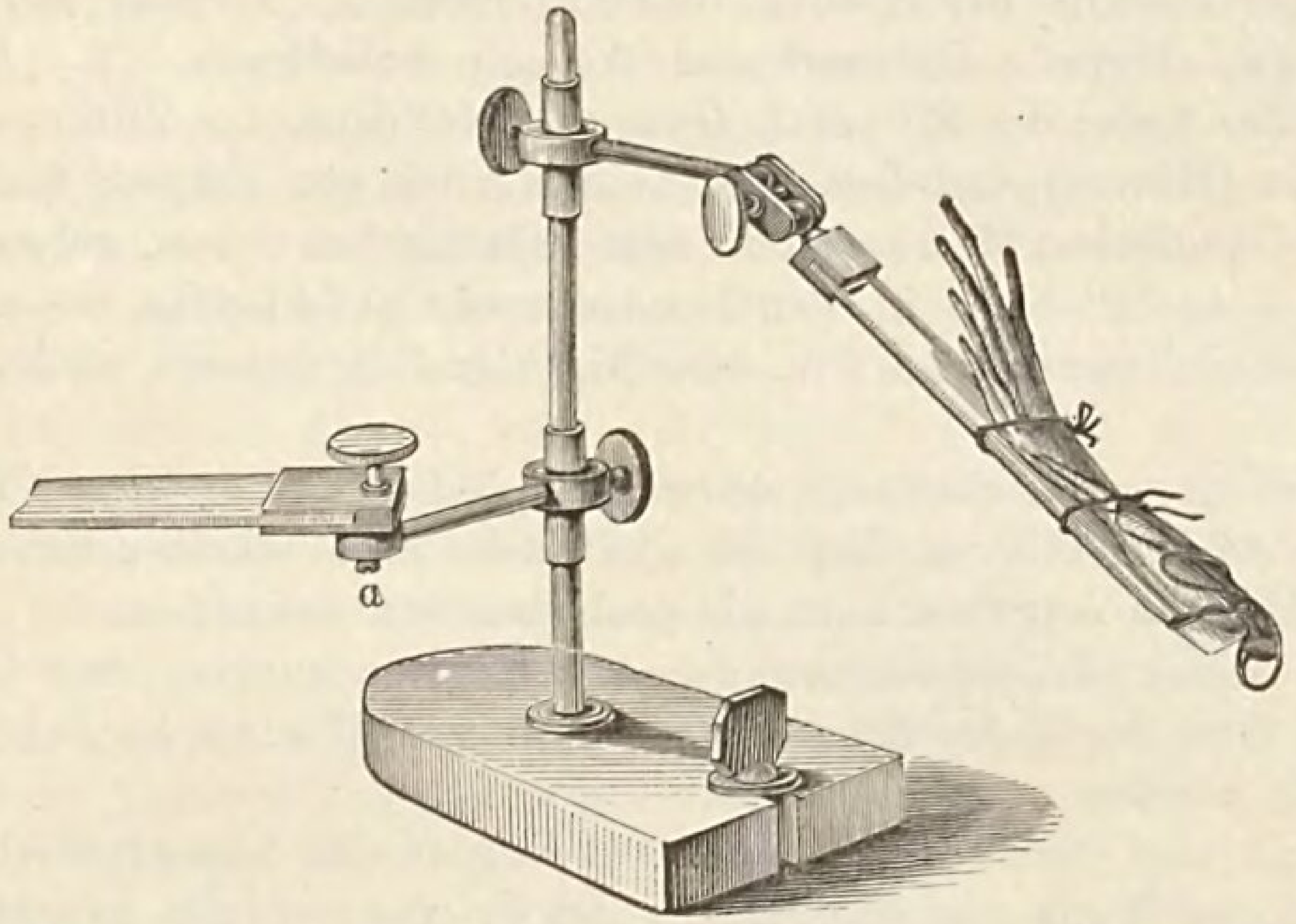
ableitbaren Theile bis 0,08 Daniell (Du Bois-Reymond), also ungefähr 0,09 Volt.

Die Zuckung ohne Metalle kann man sehr sicher mit Hülfe der beschriebenen Bäusche und eines Zwischenbausches (Fig. 884) in folgender Weise erhalten: Zwischen zwei Bäusche *a* und *b*, Fig. 885, ist ein Zwischenbausch *c* auf der einen Seite so eingeschoben, dass auf der anderen Seite der ganze Zwischenraum zwischen *a* und *b* frei bleibt. Der Zwischenraum zwischen *a* und *c* wird in der angegebenen Weise

durch den Gastrocnemius, der zwischen *b* und *c* durch den Nerven des stromprüfenden Froschschenkels überbrückt. Man bindet zu diesem Zwecke den stromprüfenden Froschschenkel auf einer Glasplatte fest, welche durch ein Fig. 886 abgebildetes Stativ getragen wird. Man bringt das Stativ und die Bäusche in die gehörige Nähe, um das freie Nervenende des stromprüfenden Froschschenkels bequem zwischen den Bäuschen *b* und *c* auflegen zu können.

Ist Alles gehörig vorbereitet, so wird die Kette geschlossen, indem man bei *d* einen Schliessungsbausch auflegt, welcher *a* und *b* leitend

Fig. 886.



verbindet. Ist der stromprüfende Froschschenkel noch empfindlich genug, so zuckt er sowohl beim Auflegen als auch beim Wegnehmen des Schliessungsbausches; hat seine Empfindlichkeit abgenommen, so zuckt er entweder nur beim Auflegen oder nur beim Wegnehmen des Schliessungsbausches.

Auch die Nerven sind, wie Du Bois zuerst gezeigt hat, im Stande, einen elektrischen Strom zu erzeugen, welcher freilich viel schwächer ist als der Muskelstrom. Die elektromotorische Kraft der Nerven beträgt 0,018 bis 0,022 Daniell (Du Bois-Reymond), also ungefähr 0,020 bis 0,024 Volt.

Näheres über die bei diesen Versuchen zu beobachtenden Vorsichtsmaassregeln und die aus jenen abgeleiteten Gesetze findet man theils in Du Bois-Reymond's classischem Werke über thierische Elektricität, Berlin 1848 — 1849, und in dessen gesammelten Abhandlungen, Leipzig 1875 — 1877, sowie in physiologischen Handbüchern.

Elektrische Fische. Man weiss schon seit langer Zeit, dass 271
der Zitterrochen die Eigenschaft hat, der Hand, die ihn angreift, eigenthümliche Schläge zu ertheilen. Um diese Wirkungen zu erklären, nahm

man früher an, dass der Zitterrochen lähmende Molecüle aussende, dass er wie eine Feder wirke, welche losgeschnellt, oder wie ein in Vibrationen befindlicher tönender Körper*). Als aber Musschenbroeck zum ersten Male den Schlag einer Leydener Flasche verspürte, hatte er die glückliche Idee, ihn mit dem Schlage des Zitterrochens zu vergleichen und so zwei Erscheinungen, deren Ursprung ganz verschieden schien, auf eine gemeinschaftliche Ursache zurückzuführen. Nun wurden auch der Zitteraal und ähnliche Fische, die man Zitterfische genannt hat, mit dem richtigeren Namen elektrische Fische bezeichnet.

Zu den bis jetzt genauer bekannten elektrischen Fischen gehören 1. aus der Familie der Rochen: die Zitterrochen, *Torpedo narce*, *sive marmorata*, *Torpedo Galvanii* und *Narcine brasiliensis*. 2. Aus der Familie der Aale: der Zitteraal, *Gymnotus electricus*, der Zitterwels, *Malapterurus* (*Silurus*) *electricus*. Die beiden Arten von *Torpedo* finden sich im Mittelländischen Meere und in dem Atlantischen Ocean, selten in der Nordsee; die Zitteraale in den Landseen von Südamerika, besonders in Guyana, der Zitterwels im Nil, dem Niger und in anderen afrikanischen Flüssen.

Nach älteren Nachrichten sollen noch *Rhinobatus electricus*, *Tetrodon electricus* und *Trichiurus electricus* elektrische Eigenschaften haben, doch sind wohl diese Angaben noch als problematisch anzusehen.

Die ersten einigermaassen genauen Untersuchungen über die elektrischen Wirkungen des Zitterrochens sind von Walsh im Jahre 1772 angestellt worden.

Wenn man durch den menschlichen Körper eine leitende Verbindung zwischen dem Bauch und dem Rücken des Thieres herstellt, so erhält man eine dem Entladungsschlag der Leydener Flasche ähnliche Erschütterung. Am besten zeigt sich die Erscheinung, wenn man den Zitterrochen mit dem Bauch auf einen metallenen Teller legt, mit einer Hand den Teller und mit der anderen den Rücken des Thieres berührt. Dieser Schlag ist selbst durch eine Reihe von mehreren Personen noch fühlbar, von denen die erste den Fisch am Leibe, die letzte am Rücken anfasst. Die geringste Unterbrechung der Leitung im Schliessungsbogen verhindert den Schlag.

Im Wasser sind die Schläge immer weniger intensiv als in der Luft, man erhält sie aber auf dieselbe Weise und unter denselben Bedingungen. Da das natürliche Wasser ein ziemlich guter Leiter ist, so begreift man, dass ein kräftiger Zitterrochen in die Ferne wirken kann, und dass es nicht mehr nöthig ist, ihn direct zu berühren. Walsh hat in der That beobachtet, dass der Zitterrochen auf einige Entfernung hin kleine Fische erschlägt, oder wenigstens betäubt.

Wenn der Zitterrochen einen Schlag giebt, so ist es stets ein willkürlicher Act; manchmal kann man ihn mehrere Male hinter einander ohne

*) Réaumur, *Académie des Sciences* 1714.

Erfolg berühren; wenn man ihn aber reizt, indem man ihn in die Flossfedern kneift, so kann man fast immer sicher sein, verstärkte Schläge zu erhalten. Walsh hat manchmal an 50 Entladungen in einer Minute gezählt.

J. Davy hat zuerst die Identität der Elektricität des Zitterrochens mit der Reibungs- und Berührungselektricität factisch dargethan, indem er mittelst derselben Stahlnadeln magnetisirte, die Magnetnadel ablenkte und chemische Wirkungen hervorbrachte.

Becquerel und Breschet haben mehrere interessante Beobachtungen an Zitterrochen von Chioggia nahe bei Venedig gemacht. Sie haben z. B. mit Hülfe eines guten Galvanometers dargethan, dass der positive Strom immer vom Rücken durch das Galvanometer zum Bauche geht; sie haben auch von Neuem bestätigt, dass der Zitterrochen willkürlich an den verschiedenen Stellen seines Körpers Schläge geben kann.

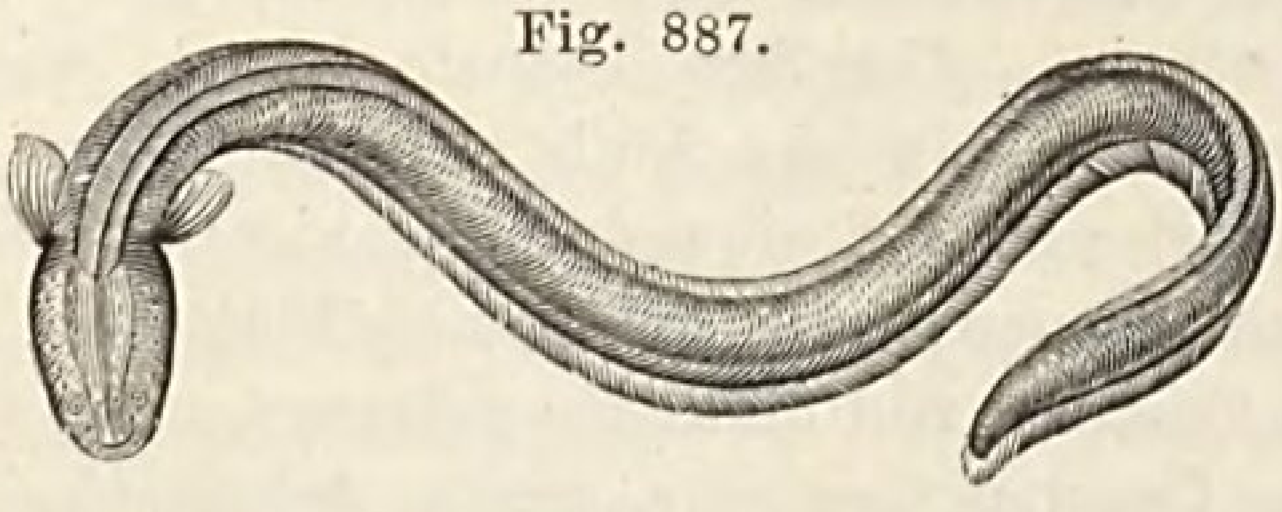
Matteucci, welcher ebenfalls interessante Versuche über die Zitterrochen des Adriatischen Meeres gemacht hat, ist dahin gelangt, durch die Elektricität dieser Thiere vollkommen sichtbare Funken zu erhalten. Er applicirte zu diesem Zweck zwei metallische Armaturen, die eine auf dem Rücken, die andere auf dem Bauche des Fisches; mit jeder dieser Armaturen setzte er ein Goldblättchen in Verbindung und brachte dann die beiden Glodblättchen sehr nahe an einander; so oft nun das Thier gereizt wurde, sprang ein Funken zwischen den Goldblättchen über.

Matteucci fand auch die schon von Becquerel und Breschet gemachte Beobachtung bestätigt, dass der Rücken positiv, der Bauch negativ elektrisch ist.

Auch Linari hat in der neuesten Zeit die Untersuchungen mit Erfolg fortgesetzt, er hat ebenfalls Funken zu gewinnen gewusst und an einem empfindlichen Condensator Zeichen elektrischer Spannung erhalten.

Der Zitteraal, Fig. 887, welcher auch der surinamische Aal genannt wird, hat eine noch weit grössere elektrische Kraft als der Zitter-

Fig. 887.



rochen. Walsh liess sich Gymnoten von Surinam kommen, mit welchen er die Resultate bestätigte, die er einige Jahre vorher an dem Zitterrochen erhalten hatte; er machte aber ausserdem noch die wichtige Beobachtung, dass sich der Schlag des Zitteraals von einem Leiter zu einem anderen durch eine dünne Luftschicht hindurch fortpflanzen kann und dass man in diesem Falle einen elektrischen Funken überspringen sieht.

Das Organ, in welchem sich die Elektricität entwickelt, hat bei den verschiedenen elektrischen Fischen im Wesentlichen dieselbe Textur,

dasselbe Ansehen, obgleich seine Gestalt, seine Grösse und seine Anordnung verschieden ist. Wir wollen versuchen, eine Idee von dem Organe des Zitterrochens zu geben, welches am genauesten untersucht worden ist.

Die Fig. 888 stellt einen Zitterrochen von oben gesehen dar, welcher auf der einen Seite geöffnet ist, so dass man das elektrische Organ

Fig. 888.

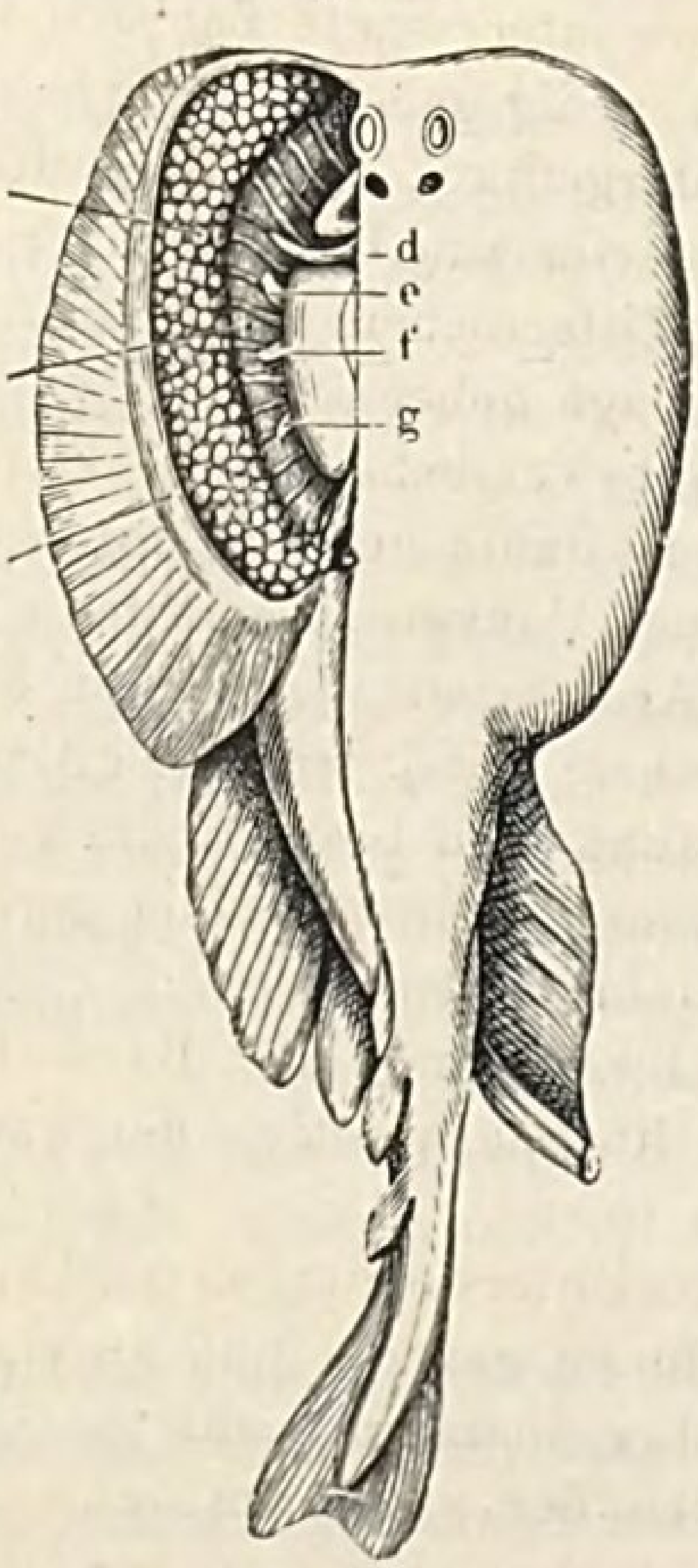
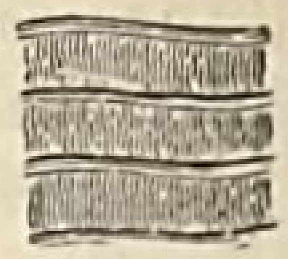


Fig. 889.



Fig. 890.



sieht. Es geht vorn bis dicht an den Vorderrand des Kopfes, seine obere Fläche stösst mittelst einer faserigen Haut an die Haut des Rückens, seine untere an die des Bauches, seine äussere Fläche ruht an dem Knorpel der Seitenflosse, seine innere an der Musculatur des Kopfes und des vorderen Theiles des Rumpfes. Von oben oder unten gesehen, zeigt das elektrische Organ polygonale oder rundliche Abtheilungen, Fig. 889; von der Seite aber sieht man parallele Streifen, wie Fig. 890 zeigt. Das ganze Organ besteht also aus einer Menge polygonaler oder rundlicher Säulchen, deren Axe die Richtung vom Bauche zum Rücken hat. Die Randbegrenzung jeder Säule bildet eine etwas dichtere sehnige Membran welche, wie es scheint, dieselben Dienste leistet, wie die Glasstäbe, zwischen welchen die galvanische Säule aufgebaut wird. Jedes Säulchen besteht aus einer Menge auf einander geschichteter feiner Blättchen; diese kleinen, bald ebenen, bald gebogenen Blättchen sind durch sehr klebrige Schleimschichten von einander getrennt, und somit bieten diese Säulchen in ihrer Construction eine grosse Aehnlichkeit mit einer aufgebauten galvanischen Säule dar.

Man zählt bei dem Zitterrochen gewöhnlich 400 bis 500 solcher Säulchen auf jeder Seite desselben; Hunter zählte deren sogar bei einem sehr grossen Exemplare von $1^1/_2$ m Länge 1184. Vier starke Nervenbündel, d, e, f und g, Fig. 888, vertheilen sich in das elektrische Organ.

Bei dem Zitteraal liegt das elektrische Organ in dem sehr langen Schwanze. Bei diesem Thiere nämlich liegt der After so weit nach vorn, dass der Schwanz des Gymnotus fast $4^1/_2$ mal so lang ist als Kopf und

Rumpf zusammengenommen; das elektrische Organ liegt fast der ganzen Länge des Schwanzes nach auf jeder Seite und unterhalb der Wirbelsäule, so dass der elektrische Apparat dieses Thieres eine bedeutende Ausdehnung hat, woher es denn auch kommen mag, dass der Zitteraal so ausserordentlich starke Schläge ertheilen kann.

Bei dem Gymnotus stehen die Säulchen, welche das elektrische Organ bilden, nicht senkrecht wie beim Zitterrochen, sondern sie laufen in der Richtung des Schwanzes fort, so dass die Scheibchen, aus denen sie bestehen, senkrecht stehen; daher kommt es denn auch, dass beim Zitteraal der positive Strom in der Richtung vom Kopfe nach dem Schwanze, also nicht wie beim Zitterrochen vom Rücken zum Bauche geht.

Uebersicht des absoluten mechanischen, elektrostatischen und elektromagnetischen Maasssystems. 272 Da die Maasseinheiten dieser Systeme und deren Beziehungen unter einander in verschiedenen zerstreuten Paragraphen besprochen worden sind, so wird es nützlich sein, dieselben nochmals in übersichtlicher Weise zusammenzustellen.

I. Das absolute mechanische (C. Gr. S.)-Maasssystem.

Die Tabelle I (a. f. S.) enthält in der ersten Columne die Art der zu messenden Grösse, in der zweiten die Maasseinheit nach Namen oder Bezeichnung, so weit solche üblich sind, in der dritten ihre Dimensionsformel, deren Bedeutung und Anwendung weiter unten erklärt werden soll, in der vierten die Definition der Maasseinheit, nach welcher gemessen wird, in der fünften erläuternde Anmerkungen und Beziehungen zu anderen Maasseinheiten.

Bezüglich des Textes dieser Tabelle verweisen wir im Allgemeinen auf die dort citirten Stellen. Ueber die Maasseinheiten der Energie und des Effects*) wollen wir noch Nachstehendes beifügen. Im mechanischen Maasssystem ist zunächst nur die mechanische Energie (Arbeit) und der mechanische Effect (Arbeit per Secunde) zu messen. Es liegt aber nahe, da die übrigen Energieformen im Aequivalentverhältnisse stehen, auch diese nach den mechanischen Maassen zu messen. Man erhält also z. B. ein mechanisches Maass der calorischen Energie, das ist der Wärmemenge, indem man jene Wärmemenge $= 1$ setzt, welche einem Erg äquivalent ist. Wir nennen diese Wärmeeinheit eine absolute Calorie; sie ist gleich dem $\frac{1}{4,15 \,.\, 10^7}$ Theile einer gewöhnlichen Grammcalorie.

Eine kurze Bezeichnung für diese calorische Energieeinheit fehlt bis jetzt ebenso wie für die äquivalente elektromagnetische Energieeinheit. Die 10^7 mal so grossen Einheiten für mechanische und elektrische Stromenergie (Joule und Voltcoulomb) gehören dem weiter unten zu besprechenden „praktischen“ Maasssysteme an.

*) Man gebraucht meistens dafür das Wort „Leistung“.

Tabelle I. Das absolute mechanische (C. Gr. S.)-Maasssystem.

Grössenart, welche zu messen ist	Name und Bezeichnung der Einheit, nach welcher gemessen wird	Dimensionsformel	Definition der Maasseinheit	Anmerkung
Länge	Centimeter C.	l	1 Centimeter $= \frac{\text{Länge d. Erdquadranten}}{10^9}$.	Da es nicht möglich ist, die Länge der Einheit aus dem Erdquadranten ebenso genau abzuleiten, als die Maassstäbe unter sich verglichen werden können, so wird als praktische Längeneinheit der hundertste Theil des in Paris aufbewahrten Platinmeterstabes angenommen (siehe Bd. I, S. 44).
Masse	Gramm Gr.	m	1 Gramm ist die Masse irgend eines Körpers, der durch eine bewegende Kraft dieselbe Beschleunigung erfährt, wie 1 ccm Wasser grösster Dichte.	Da auch diese Einheit nicht ebenso genau herzustellen ist, als Massen auf der Wage mit einander verglichen werden können, so wird als praktische Masseneinheit der 1000 ste Theil des in Paris aufbewahrten Platinkilogramms angenommen.
Zeit	Secunde S.	t	1 Secunde $= \frac{\text{Mittlerer Sonnentag}}{86400}$.	Der mittlere Sonnentag (bürgerliche Tag) beträgt 1,002 7379 Sterntage (siehe Bd. I, S. 69)
Geschwindigkeit	—	$\frac{l}{t}$	Die Geschwindigkeit 1 ist jene eines Punktes, welcher per Secunde 1 cm Weg zurücklegt.	Ist die Geschwindigkeit nicht constant, so gilt als momentane Geschwindigkeit die Grenze, der sich der Quotient $\frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}}$ nähert.
Beschleunigung (Acceleration)	—	$\frac{l}{t^2}$	Die Beschleunigung 1 hat jener Punkt, dessen Geschwindigkeit per Secunde um 1 cm zunimmt.	Ist die Beschleunigung nicht constant, so gilt als momentane Beschleunigung die Grenze, welcher sich der Quotient $\frac{\text{Geschwindigkeit}}{\text{Zeit}}$ nähert. Abnahme der Geschwindigkeit wird als negative Beschleunigung gerechnet (Bd. I, S. 78).

Kraft	Dyne*)	$\frac{lm}{t^2}$	1 Dyne ist jene Kraft, welche der Masse 1 Gramm die Beschleunigung 1 ertheilt (welche die Geschwindigkeit der Masse 1 g per Secunde um 1 cm ändert).	1 Dyne $= \frac{\text{Gewicht eines Gramms}}{\text{Acceleration d. Schwere}} =$ Gewicht von $\frac{1}{981}$ g oder 1,02 mg (Bd. I, S. 92).
Mechanische Energie (Arbeit)	Erg	$\frac{l^2 m}{t^2}$	1 Erg ist jene Arbeit, welche zur Ueberwindung der Kraft 1 Dyne längs des Weges 1 cm erforderlich ist.	1 Erg $= \frac{\text{Centimeter-Grammgewicht}}{\text{Acceleration der Schwere}} =$ Hebung von $\frac{1}{981}$ g oder 1,02 mg auf 1 cm Höhe $= \frac{\text{Joule}}{10^7} = \frac{\text{Meterkilogrammgew.}}{9{,}81 \,.\, 10^7}$ (Bd. I, S. 249, Bd. III, S. 517). Mit der absoluten Einheit der mechanischen Energie äquivalent ist die absolute Einheit der calorischen Energie, d. i. die absolute Calorie $= \frac{\text{Gramm-Wasser-Calorie}}{4{,}15 \,.\, 10^7}$ (Bd. III, S. 512). Mit der absoluten Einheit der mechanischen Energie ebenfalls äquivalent ist die absolute elektromagnetische Einheit der Stromenergie, welche $= \frac{\text{Voltcoulomb}}{10^7}$ (Bd. III, S. 516).
Mechanischer Effect (Arbeit per Sec.) oder Leistung	Erg per Sec. (Secundenerg)	$\frac{l^2 m}{t^3}$	1 Secundenerg ist jener Effect, welcher der Arbeitsleistung von 1 Erg per Secunde gleichkommt.	1 Secundenerg $= \frac{\text{Watt}}{10^7} = \frac{\text{Sec.-Meter-Kilogrammgew.}}{9{,}81 \,.\, 10^7} = \frac{\text{Pferd}}{736 \,.\, 10^7}$. Diese Einheit des mechan. Effects ist äquivalent mit der absoluten elektromagnetischen Einheit des Stromeffects, welche $= \frac{\text{Volt-Ampère}}{10^7}$ (Bd. III, S. 517).

*) Statt „die Dyne" wird auch „das Dyn" gebraucht.

Ein von der Energie wesentlich verschiedener Begriff ist der Effect (Leistung).

Die Grösse einer Arbeit oder Energie ist unabhängig von der Zeit, in welcher sie geleistet wird. Ob z. B. eine gewisse Wassermenge von einem höheren Niveau auf tieferes Niveau auf einmal oder nach und nach herabsteigt, ändert die Grösse der dabei gewonnenen Arbeit nicht. Ebenso ist es für die gewonnene calorische Energie gleichgültig, ob ein Quantum Gas auf einmal oder allmälig verbrennt; endlich ist es für die Stromenergie gleichgültig, ob ein Quantum Elektricität vom höheren Potential auf das tiefere schnell oder langsam abfliesst.

Anders verhält es sich mit dem Effect, d. i. mit der per Secunde geleisteten Energie.

Der Effect dient zur Messung einer constanten Energiequelle. Bei einem constanten Wasserfalle, bei einer constant brennenden Gasflamme, endlich bei einem constanten elektrischen Strome kann man nur die in der Zeiteinheit gelieferte Energie, also den Effect, in Betracht ziehen und messen. Ebenso ist die Arbeitsleistung eines Pferdes unbestimmt, wenn man sie nicht auf die Zeiteinheit bezieht. Die absolute mechanische Einheit des Effects ist demnach im (C. Gr. S.)-System das Erg per Secunde oder Secundenerg, wofür kein specieller Name üblich ist. Die 10^7 mal so grosse Maasseinheit des mechanischen Effects (Watt) und des äquivalenten Stromeffects (Volt-Ampère) gehören dem praktischen Maasssysteme an.

II. Das absolute elektrostatische Maasssystem. Dasselbe ist mit seinen meist gebrauchten Maassen in Tabelle II (S. 1031) zusammengestellt und erfordert keine weitere Erklärung, da dieselbe bereits in den citirten Stellen des Buches zu finden ist.

III. Das absolute magnetische und elektromagnetische Maasssystem. Die drei ersten Maasse sind magnetische; sie wurden bereits im §. 26 abgeleitet. Hierauf folgt die auf das Verhalten des Stromes auf den Magnet gegründete absolute Einheit der Stromstärke und der Elektricitätsmenge. Von hier aus kann man dann einen doppelten Weg einschlagen, je nachdem man zuerst auf Grund der Gesetze von Ohm und Joule die Einheit des Widerstandes und dann mit Hülfe der letzteren die Einheit der elektromotorischen Kraft ableitet; oder zuerst auf Grund der Induction im magnetischen Felde die Einheit der elektromotorischen Kraft und mit Hülfe von dieser die Einheit des Widerstandes definirt. Wir haben im Lehrbuche zuerst (§. 126) aus dort angegebenem Grunde den ersteren Weg eingeschlagen und den anderen später (§. 192) nachgeholt, obwohl die historische Reihenfolge die umgekehrte war. In der Tabelle III (S. 1032, 1033) sind beide Definitionen aufgeführt; ihr übriger Inhalt erfordert keine weitere Erklärung.

IV. Das praktische elektromagnetische Maasssystem. Dieses Maasssystem, welches man wohl auch das elektrotechnische nennen könnte, da es in der Elektrotechnik fast ausschliesslich gebraucht wird, unterscheidet sich von dem elektromagnetischen (C. Gr. S.)-System

Tabelle II. Das absolute elektrostatische (c. gr. s.) - Maasssystem.

Grössenart, welche zu messen ist	Dimensionsformel	Definition der Maasseinheit	Anmerkung
Elektricitätsmenge	$\frac{l^{1/2} m^{1/2}}{t}$	Elektrostatische Einheit der Elektricitätsmenge ist jene Menge, welche auf eine ihr gleiche Menge im Abstande 1 cm die Kraft 1 Dyne ausübt (S. 207).	Dabei wird vorausgesetzt, dass die Dimensionen der geladenen Körper verschwindend klein seien gegenüber ihrem Abstande, so dass die Influenzwirkung zu vernachlässigen. Man entgeht dieser Schwierigkeit durch die Definition: Einheit der Elektricitätsmenge ist jene, welche auf eine ihr gleiche Menge im (grossen) Abstande r die Kraft $\frac{1}{r^2}$ Dynen ausübt.
Potential	$\frac{l^{1/2} m^{1/2}}{t}$	Das Potential 1 besitzt ein Körper, wenn der Abfluss der Elektricitätsmenge 1 von ihm auf die Erde die Arbeit 1 Erg zu leisten vermag.	Dabei wird vorausgesetzt, dass die Elektricitätsmenge 1 verschwindend klein sei gegenüber der vorhandenen Menge. Ist dies nicht der Fall, so ist das mittlere Potential vor und nach dem Abfluss = 1, wenn die abfliessende Menge 1 die Arbeit 1 Erg leistet.
Potentialdifferenz	"	Die Potentialdifferenz 1 besteht zwischen zwei Körpern, wenn der Uebergang der Elektricitätsmenge 1 von einem zum anderen die Arbeit 1 Erg kostet oder leistet (S. 209).	Mit Rücksicht auf das Folgende kann gesagt werden: Das Potential 1 hat eine Kugel vom Radius 1 cm, welche eine ihr gleiche und gleich geladene Kugel im (grossen) Abstande r mit der Kraft $\frac{1}{r^2}$ Dynen abstösst (S. 212).
Capacität	l	Die Capacität 1 hat ein Körper, welcher durch die Elektricitätsmenge 1 zum Potential 1 geladen wird (S. 214).	Damit stimmt überein die Definition: Capacität 1 hat ein Körper, dessen Potential durch dieselbe Zahl ausgedrückt wird, wie die auf ihm befindliche Elektricitätsmenge. Ferner gilt: Die Capacität 1 ist gleich jener einer Kugel vom Radius 1 cm, welche jeder Influenzwirkung entzogen ist (S. 215).
Stromstärke	$\frac{l^{3/2} m^{1/2}}{t^2}$	Als Einheit der Stromstärke wird die Stärke eines Stromes definirt, welcher per Secunde eine Einheit nach elektrostatischem Maasse gemessener Menge von Elektricität durch den Querschnitt des Leiters führt.	
Widerstand	$\frac{t}{l}$	Als Einheit des Widerstandes gilt jener W., in welchem eine Stromstärke 1 besteht, wenn seine Enden auf der Potentialdifferenz 1 erhalten werden.	

Tabelle III. Das absolute magnetische und elektromagnetische (C.Gr.S.)-Maasssystem.

Grössenart, welche zu messen ist	Dimensionsformel	Definition der Maasseinheit	Anmerkung
Polstärke, (freier Magnetismus, Einheitspol)	$\frac{l^{3/2} m^{1/2}}{t}$	Die Polstärke Eins hat jener Pol, der einen zweiten ihm gleichen im Abstande 1 cm mit der Kraft von 1 Dyne abstösst (§. 26).	Dabei ist auf die gegenseitige Influenz der Pole keine Rücksicht genommen. Da diese bei 1 cm Abstand nicht zu vernachlässigen ist, so wäre die Definition genauer so zu formuliren: Die Polstärke Eins hat ein Pol, der einen ihm gleichen im (grossen) Abstande r mit der Kraft von $\frac{1}{r^2}$ Dynen abstösst.
Stabmagnetismus (magnetisches Moment)	$\frac{l^{5/2} m^{1/2}}{t}$	Den Stabmagnetismus Eins hat ein Magnetstab mit zwei Polen von je der Stärke Eins im Abstande 1 cm (§. 26, 44).	Das magnetische Moment oder der Stabmagnetismus ist gleich dem Product der Polstärke eines der Pole mit dem gegenseitigen Abstande derselben. Eine Einheit des Stabmagnetismus nach dem (C. Gr. S.)-System ist = 10^4 Einheiten nach dem (Millim. Milligr. S.)-System von Gauss.
Intensität des magnetischen Feldes	$\frac{m^{1/2}}{l^{1/2} t}$	Die Intensität Eins herrscht in einem magnetischen Felde, wenn durch dasselbe auf einen Pol vom Magnetismus Eins die Kraft 1 Dyne ausgeübt wird (§. 26).	Befindet sich in einem solchen Felde ein Magnet vom Momente Eins, welcher mit seiner Axe senkrecht auf den Kraftlinien steht, so erhält derselbe ein Drehungsmoment = Eins.
Stromstärke	$\frac{l^{1/2} m^{1/2}}{t}$	Die Stärke Eins hat ein Strom, welcher, einen Kreisbogen von 1 cm Länge und 1 cm Radius durchfliessend, auf einen im Mittelpunkte des Kreises befindlichen Pol von der Stärke 1 die Kraft 1 Dyne ausübt (§. 121).	Damit zusammenfallend sind die Definitionen: Stärke Eins hat jener Kreisstrom vom Radius r, welcher auf eine im Centrum in seiner Ebene aufgehängte (kurze) Magnetnadel vom Stabmagnetismus Eins ein Drehungsmoment = $\frac{2\pi}{r}$ ausübt. Die Stärke Eins hat ein Strom, welcher, die Flächeneinheit umkreisend, in die Ferne wirkt, wie ein zur Stromebene senkrechter (kurzer) Magnet von der Einheit des Stabmagnetismus. Diese Stromeinheit des (C. Gr. S.)-Systems ist = 100 Einheiten des (Milligr. Millim. S.)-Systems von Weber und = 10 Einheiten des praktischen Systems (Ampère) (§. 221).

Elektricitätsmenge	$l^{\frac{1}{2}} m^{\frac{1}{2}}$	Elektricitätsmenge Eins ist jene Menge von Elektricität, welche bei einer Stromstärke Eins per Secunde durch den Querschnitt des Leiters strömt (§. 121).	Eine solche Einheit der Elektricitätsmenge zersetzt oder scheidet aus 0,000933 g Wasser, 0,003281 g Kupfer, 0,01118 g Silber (§. 119, 120, 122). Eine solche Einheit (C. Gr. S.) = 10 Einheiten des praktischen Systems (Coulomb).
Widerstand	$\frac{l}{t}$	Widerstand Eins ist der Widerstand jenes Leiters, in welchem der Strom Eins per Secunde eine der Arbeit 1 Erg äquivalente Wärmemenge entwickelt (§. 126).	Ist die Einheit der elektromotorischen Kraft vorher schon definirt, so kann man sagen: Einheit des Widerstandes ist jener, in welchem die Einheit der elektromotorischen Kraft die Stromstärke Eins entwickelt. 10^9 solche Widerstandseinheiten sind gleich der praktischen Einheit (Ohm) (§. 203).
Elektromotorische Kraft, Potentialdifferenz (Spannung)	$\frac{l^{\frac{3}{2}} m^{\frac{1}{2}}}{t^2}$	Elektromotorische Kraft Eins ist jene, welche in einem Leiter vom Widerstande Eins die Stromstärke Eins hervorruft. Potentialdifferenz Eins ist jene, welche an den Enden eines Leiters vom Widerstand Eins herrschen muss, damit die Stromstärke Eins entsteht (§. 131, 132).	Die auf die Induction gegründete Definition lautet: Einheit der elektromotorischen Kraft ist jene, welche in einem Leiter von 1 cm Länge erregt wird, welcher mit der Geschwindigkeit 1 cm in auf die Kraftlinien senkrechter Lage und Richtung durch ein magnetisches Feld von der Intensität Eins bewegt wird. Diese Einheit stimmt mit der auf die nebenstehende Weise definirten überein (§. 192, 193, 203). 10^8 solche Einheiten sind gleich der praktischen Einheit (Volt).
Capacität	$\frac{t^2}{l}$	Einheit der Capacität hat jener Leiter, der durch die Einheit der Elektricitätsmenge zum Potential Eins geladen wird.	Eine solche Capacitätseinheit = 10^9 Farad (prakt. Einheit) " = 10^{15} Mikrofarad " " = $9 . 10^{20}$ Einheiten des elektrostatischen (c. gr. s.) - Maasssystems
Stromenergie	$\frac{l^2 m}{t^2}$	Einheit der Stromenergie ist jene Energie, welche entwickelt wird, indem die Einheit der Elektricitätsmenge einen Leiter durchströmt, an dessen Enden die Potentialdifferenz Eins herrscht. Diese Einheit ist äquivalent mit 1 Erg (§. 147, 148).	Damit identisch ist die Stromenergie, welche ein Strom von der Stärke Eins entwickelt, der eine Secunde lang einen Leiter vom Widerstande Eins durchströmt. Dieser Stromenergie entspricht eine Wärmeentwickelung von $\frac{1}{4,15 . 10^7}$ = 0,000000024 Grammcalorien; 10^7 solche Einheiten sind äquivalent der praktischen Einheit der mechanischen Energie (Joule).
Stromeffect (Stromarbeit per Secunde)	$\frac{l^2 m}{t^3}$	Einheit des Stromeffects ist jener Effect, welcher der Entwickelung von 1 Erg Stromenergie per Secunde entspricht; also Erg per Secunde oder Secundenerg (§. 147, 148).	Damit identisch ist der Stromeffect, den ein Strom von der Stärke Eins in einem Widerstande von der Grösse Eins entwickelt. Dem Stromeffect Eins entspricht die Entwickelung von $\frac{1}{4,15 . 10^7}$ = 0,000000024 Grammcalorien per Secunde. 10^7 solche Einheiten sind äquivalent der praktischen Einheit des mechanischen Effects (Watt).

Tabelle IV. Das praktische elektromagnetische Maasssystem (Elektrotechnisches Maasssystem).

Grössenart, welche zu messen ist	Name und abgekürzte Bezeichnung der Maasseinh.	Dimensionsformel	Definition der Maasseinheit	Anmerkung
Mechanische Energie (Arbeit)	Joule	$10^7 \frac{l^2 m}{t^2}$	1 Joule = 10^7 Erg ist das Zehnmillionfache der Arbeit, die zur Ueberwindung einer Dyne längs 1 cm erforderlich ist (§. 148).	1 Joule = $\frac{\text{Meterkilogrammgew.}}{9{,}81}$ (Gravitationsmaass) „ äquivalent mit 0,24 Grammcalorien.
Mechanischer Effect (Arbeit per Sec.)	Watt	$10^7 \frac{l^2 m}{t^3}$	1 Watt ist jener Effect, bei welchem per Secunde 1 Joule = 10^7 Erg Arbeit geleistet wird (§. 148).	1 Watt = $\frac{\text{Meterkilogrammgew.}}{9{,}81}$ per Secunde (Gravitationsmaass). = $\frac{1}{736}$ Pferdekraft.
Stromstärke	Ampère A.	$\frac{1}{10} \frac{l^{1/2} m^{1/2}}{t}$	1 Ampère ist $\frac{1}{10}$ des Stromes, welcher, einen Kreisbogen von 1 cm Länge und 1 cm Radius durchfliessend, auf einen im Mittelpunkt des Kreises befindlichen Pol von der Stärke 1 (C. Gr. S.) die Kraft 1 Dyne ausübt (§. 121).	1 Ampère ist also gleich $\frac{1}{10}$ der elektromagnetischen Stromeinheit des (C. Gr. S.)-Systems.
Elektricitätsmenge	Coulomb Cb.	$\frac{1}{10} l^{1/2} m^{1/2}$	1 Coulomb ist jene Elektricitätmenge, welche bei einer Stromstärke von 1 Ampère per Secunde durch den Querschnitt des Leiters strömt. (§. 121).	1 Coulomb ist also gleich $\frac{1}{10}$ der elektromagnetischen Einheit der Elektricitätsmenge nach dem (C. Gr. S.)-System und gleich $3{,}10^9$ Einheiten des elektrostatischen (c. gr. s.)-Systems. 1 Cb. zersetzt 0,0000933 g Wasser, „ scheidet aus 0,0003281 g Kupfer, „ „ „ 0,001118 g Silber.
Widerstand	Ohm Ω	$10^9 \frac{l}{t}$	1 Ohm ist der Widerstand eines Leiters, in welchem der Strom von 1 Ampère einen Effect 1 Watt (oder die äquivalente Wärmemenge von 0,24 Grammcalorien) entwickelt. (§. 126).	Diese Definition, welche auf den Gesetzen von Ohm und Joule beruht, ist durch folgende ersetzbar, wenn vorher die Einheit der elektromotorischen Kraft auf Grundlage der Induction definirt ist. 1 Ω ist der Widerstand eines Leiters, in welchem

				durch die elektromotorische Kraft 1 Volt der Strom von 1 Ampère hervorgebracht wird. 1 Ω ist = 1,063 Siemenseinheiten = dem Widerstande einer Quecksilbersäule von 106,3 cm Länge und 1 qmm Querschnitt. 1 legales Ω = 1,06 S. E. 1 Ω ist ungefähr = dem Widerstand von 47 m Kupferdraht von 1 mm Durchmesser.
Elektromotor. Kraft, Potentialdifferenz	Volt V.	$10^8 \frac{l^{1/2} m^{1/2}}{t^2}$	1 Volt ist jene elektromotorische Kraft oder jene Potentialdifferenz, welche in einem Leiter von 1 Ω Widerstand einen Strom von 1 A. erzeugt (§. 131).	Die auf die Induction gegründete Definition derselben Einheit lautet: 1 Volt ist das 10^8 fache jener elektromotorischen Kraft, welche in einem Leiter von 1 cm Länge geweckt wird, wenn derselbe mit der Geschwindigkeit 1 cm per Secunde in senkrechter Lage und Richtung zu den Kraftlinien durch ein Magnetfeld von der Intensität 1 (C. Gr. S.) bewegt wird (§. 193). 1 Volt = 300 Einheiten des elektrostatischen (c. gr. s.)-Systems „ = 0,92 Daniell.
Capacität	Farad Φ	$\frac{1}{10^9} \cdot \frac{t^2}{l}$	1 Farad ist die Capacität eines Leiters, welcher mit der Elektricitätsmenge 1 Coulomb zum Potential 1 Volt geladen wird.	1 Farad = 1 Million Mikrofarad = $\frac{1}{10^9}$ Capacitätseinheit des elektromagnetischen (C. Gr. S.)-Systems. 1 Mikrofarad = 900 000 Capacitätseinheiten des elektrostatischen (c. gr. s.)-Systems.
Stromenergie	Voltcoulomb V. Cb.	$10^7 \frac{l^2 m}{t^2}$	1 Voltcoulomb Stromenergie wird entwickelt, indem die Elektricitätsmenge 1 Coulomb einen Leiter durchfliesst, an dessen Enden die Potentialdifferenz 1 Volt herrscht. Oder indem ein Coulomb einen Leiter vom Widerstand 1 Ohm durchfliesst (§. 148).	1 Voltcoulomb ist äquivalent mit 1 Joule, „ „ 10^7 Erg, „ „ 0,24 Grammcalorien (§. 147).
Stromeffect	Voltampère V. A.	$10^7 \frac{l^2 m}{t^3}$	Der Stromeffect 1 Voltampère wird entwickelt von einem Strom, der mit der Stärke 1 Ampère einen Leiter durchfliesst, dessen Enden die Potentialdifferenz 1 Volt besitzen, oder dessen Widerstand gleich 1 Ohm ist (§. 148).	1 Voltampère ist äquivalent mit 1 Watt, „ „ 10^7 Secundenerg, „ „ $\frac{1}{736}$ Pferdekraft.

nur dadurch, dass die Einheiten des letzteren mit Potenzen von 10 multiplicirt, beziehungsweise dividirt sind, um den Maassen eine für die praktische Anwendung bequeme Grösse zu geben. Diesem Maasssytem liegen als Längeneinheit die Länge des Erdquadranten (10^7 m), als Masseneinheit 10^{-11} g, als Zeiteinheit die Secunde zu Grunde *). Bei Anwendung dieser Grundmaasse würden also die in der Tabelle IV. Columne 3 den Dimensionen vorgesetzten aus Potenzen von 10 bestehenden Coëfficienten wegfallen.

Dabei sind auch noch die beiden mechanischen Maasse für Energie und Effect herangezogen worden, indem man 10^7 Erg als Joule, 10^7 Erg per Secunde als Watt bezeichnete **). Der zehnte Theil der absoluten Stromeinheit (C. Gr. S.) wurde als Ampère, ebenso der zehnte Theil der absoluten Einheit der Elektricitätsmenge als Coulomb bezeichnet. Das Tausendmillionfache der absoluten Widerstandseinheit (C. Gr. S.) wurde Ohm, das Hundertmillionfache der Einheit der elektromagnetischen Kraft des (C. Gr. S.)-Systems wurde Volt genannt. Die unbequem grosse Einheit der Capacität des (C. Gr. S.)-Systems wurde auf den tausendmillionten Theil verkleinert als Farad und, da auch diese Einheit noch sehr gross ist, nochmals auf ein Milliontel verkleinert als Mikrofarad eingeführt. Für Stromenergie und Stromeffect wurde je der zehnmillionte Theil der gleichnamigen Maasse des (C. Gr. S.)-Systems adoptirt und dafür die Bezeichnungen Voltcoulomb und Voltampère angenommen. Statt dieser werden aber auch oft die äquivalenten Einheiten der mechanischen Energie und des mechanischen Effects: Joule und Watt gebraucht. Es wäre aber doch zweckmässiger, diese Bedeutungen auseinander zu halten. Es ist nämlich nicht gleichgültig, ob man ein Quantum Energie in Form von mechanischer oder von elektrischer Energie besitzt, ob man eine Quelle mechanischen Effects, z. B. ein Wassergefälle, oder eine Quelle elektrischen Effects, z. B. einen elektrischen Strom, zur Verfügung hat, weil eine Umwandlung des einen in das andere in der Praxis immer mit einem Verluste für uns verbunden ist. Bei der elektrischen Kraftübertragung werden beispielsweise eine Anzahl Watt in Voltampère und diese rückwärts in Watt verwandelt. Eine Dampf- oder Gasmaschine erzeugt zunächst ein Anzahl Watt, welche erst in der Dynamomaschine in Voltampère umgesetzt werden. Joule und Voltcoulomb einerseits, Watt und Voltampère andererseits sind also zwar physikalisch

*) Daher wurde dieses Maasssystem auch das Undecimogramm-Hebdomometer-Secunden-System genannt, welche Bezeichnung wohl zu schleppend ist, um Anklang zu finden.

**) Wir berichtigen bei dieser Gelegenheit eine unrichtige Stelle in den Anmerkungen S. 248 u. 249 des I. Bandes. Als wir jene Stelle schrieben, war die Bezeichnung Joule noch nicht üblich geworden und wurde dafür Watt bald als „Arbeit per Secunde“ (Effect), bald als Arbeit (Energie) gebraucht. Es sollte daher in jenen Anmerkungen statt Watt Joule stehen und der Ausdruck „Dampfpferd“ ganz gestrichen werden. Die richtigen Bedeutungen von Joule und Watt wurden übrigens bereits S. 517 dieses Bandes auseinandergesetzt.

äquivalente, aber doch nicht identische Maasseinheiten. Leider fehlt für die einem Joule äquivalente calorische Energie bis jetzt eine specielle Bezeichnung. Bei dieser ist es besonders klar zu zeigen, dass es nicht angeht, für alle Arten der Energie eine gleiche Bezeichnung ihrer Einheit ausschliesslich zu benutzen. Man müsste dann immer wieder durch die Beiwörter mechanisch, colorisch etc. die mechanische Energie von der calorischen Energie unterscheiden. Man darf nicht übersehen, dass nach dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie wohl eine mechanische Energieeinheit ganz in eine calorische, aber umgekehrt nur in beschränkter Weise umgesetzt werden kann; erstere daher für uns werthvoller ist als letztere. Zwischen mechanischer und elektrischer Energie besteht dieser Unterschied nicht, denn theoretisch sind sie gegenseitig vollkommen umsetzbar. In der Praxis geht aber stets ein Theil für uns verloren. Wer demnach eine gewisse Anzahl Voltampère benöthigt, dem kann es nicht gleichgültig sein, ob wir ihm solche zur Verfügung stellen oder statt dessen eine gleiche Anzahl Watt, die er sich erst mit praktischem Verluste in jene umwandeln muss.

Von diesen Erwägungen geleitet, haben wir in der Tabelle IV. (S. 1036 u. 1037) und auch früher im Texte die betreffenden Bezeichnungen auseinander gehalten, obwohl sie von vielen Autoren als identisch unter einander verwechselt werden. Die praktischen Maasse sind auf solche relative Grösse gebracht, dass sie unter sich in möglichst einfacher Beziehung stehen. Wir haben:

$$\begin{aligned}
\text{Watt} &= \text{Joule per Secunde,}\\
\text{Ampère} &= \text{Coulomb per Secunde,}\\
\text{Voltampère} &= \text{Voltcoulomb per Secunde,}\\
\text{Ampère} &= \frac{\text{Volt}}{\text{Ohm}},\\
\text{Coulomb} &= \text{Volt . Farad.}
\end{aligned}$$

Näheres über Maasssysteme und Einschlägiges ist in Specialschriften nachzulesen *).

Die Dimensionsformeln, ihre Bedeutung und Anwendung. Die in den Tabellen des vorigen Paragraphen angeführten Dimensionsformeln, welche von Fourier begründet, von Maxwell neuerdings eingeführt worden sind, stellen symbolische Formeln vor, welche die abgeleiteten Maasse als Producte (Quotienten) von Potenzen der gewählten Grundmaasse darstellen. 273

*) Dr. H. Herwig, Physikalische Begriffe und absolute Maasse. Leipzig 1880. Everett, Physikalische Einheiten und Constanten, deutsch von P. Chappuis und D. Kreichgauer. Leipzig 1888. A. v. Waltenhofen, Die internationalen absoluten Maasse, insbesondere die elektrischen Maasse. Braunschweig, Friedrich Vieweg und Sohn, 1885.

Solche Dimensionsformeln kommen bereits in der Geometrie vor. Bedeutet l eine Länge, so bedeutet l^2 eine Fläche, l^3 ein Volum.

Die physikalischen Dimensionsformeln lassen sich alle aus den drei Grundmaassen der Länge l, der Masse m und der Zeit t aufbauen. So z. B. bedeutet $\frac{l}{t}$ eine Geschwindigkeit, $\frac{l}{t^2}$ eine Beschleunigung, $\frac{lm}{t^2}$ eine Kraft, $\frac{l^2 m}{t^2}$ eine Arbeit, $\frac{l^2 m}{t^3}$ einen Effect. Man sagt also z. B.: $\frac{l\,m}{t^2}$ sei die Dimension einer Kraft*). Im Allgemeinen haben also alle diese Dimensionsformeln die Form:

$$l^a m^b t^c,$$

wo a, b, c ganze oder gebrochene, positive oder negative Exponenten vorstellen, welche auch $= 0$ sein können, in welchem Falle das betreffende Grundmaass ganz ausfällt, wie z. B. in der Dimension für die Geschwindigkeit $\frac{l}{t} = l t^{-1}$ die Masse m fehlt.

Legt man ein bestimmtes Maasssystem bei einer Messung zu Grunde, hat man zum Beispiel eine Kraft nach dem Centimeter-Gramm-Secunden-System (also nach Dynen) gemessen, und findet, dass die gemessene Kraft n solcher Einheiten enthalte, so kann man dies wie folgt anschreiben:

$$\text{Gemessene Kraft} = n\ (\text{C. Gr. S.}^{-2}),$$

oder

$$\text{Gemessener Effect} = m\ (\text{C.}^2\,\text{Gr. S.}^{-3}).$$

Da man aber in der Regel schon weiss, welche Dimensionen der Kraft, beziehungsweise dem Effect zukommen, so genügt auch die Schreibweise:

$$\text{Gemessene Kraft} = n\ (\text{C. Gr. S.}),\ \text{gemessener Effect} = m\ (\text{C. Gr. S.}),$$

womit nur angezeigt wird, dass die Messung nach dem (C. Gr. S.)-System erfolgt ist.

Die Dimensionsformel hat aber den Vortheil, dass man das Messresultat sofort aus einem Maasssystem in ein anderes mit grösseren oder kleineren Grundeinheiten umrechnen kann.

Angenommen, man habe eine Grösse im (C. Gr. S.)-System gemessen und die

$$\text{gemessene Grösse} = n\ (\text{C.}^a\,\text{Gr.}^b\,\text{S.}^c)$$

gefunden. Man wolle jetzt auf ein Maasssystem übergehen, in welchem die Längeneinheit $= p$ Centimeter, die Masseneinheit $= q$ Gramm, die

*) Statt $\frac{l\,m}{t^2}$ kann natürlich auch $l\,m\,t^{-2}$ geschrieben werden. Nach unserer Erfahrung tritt die erstere Schreibweise deutlicher ins Auge und prägt sich besser dem Gedächtnisse ein, weshalb wir ihr den Vorzug gaben, obwohl wir auch die Vortheile der letzteren Schreibweise beim Rechnen und wegen der Raumersparniss anerkennen.

Zeiteinheit $= r$ Secunden gewählt wurden. Es ist ersichtlich, dass die neue Maasseinheit $p^a\, q^b\, r^c$ mal so gross als die frühere, mithin der Zahlenwerth der gemessenen Grösse ebenso vielmal so klein, als der frühere werden muss.

Der neue Zahlenwerth N wird also durch die Beziehung

$$N = \frac{n}{p^a\, q^b\, r^c}$$

zu berechnen sein.

Es sei z. B. ein magnetisches Moment aus dem (C. Gr. S.)-System in das von Gauss gebrauchte Milligramm-Millimeter-Secunden-System umzurechnen. Die Dimension des magnetischen Moments ist $\frac{l^{5/2}\, m^{1/2}}{t}$ $= l^{5/2} m^{1/2} t^{-1}$; da ein Milligramm $= \frac{1}{1000}$ Gramm, ein Millimeter $= \frac{1}{10}$ Centimeter, so ist die Gauss'sche Maasseinheit $\frac{1}{1000} \cdot \frac{1}{10} = \frac{1}{10\,000}$ mal so gross als die des (C. Gr. S.)-Systems oder eine Einheit der letzteren $= 10^4$ Gauss'schen Einheiten. Das magnetische Moment fällt demnach im Gauss'schen Maasse 10^4 mal so gross aus.

Auf ähnliche Weise lässt sich das Verhältniss der einzelnen „praktischen" Einheiten zu jenen des (C. Gr. S.)-Systems ableiten, wie solches in der Tabelle IV angegeben ist.

Die Beachtung der Dimensionen der physikalischen Grössen kann noch in mehrfacher Weise nützlich sein. So ist z. B. bemerkenswerth, dass, da nur gleichartige Grössen addirt oder subtrahirt werden können, auch nur Grössen gleicher Dimension als Summanden in einer physikalischen Gleichung vorkommen können. Hat man durch Erfahrung erkannt, dass eine physikalische Grösse die Function einer noch unbekannten Potenz einer anderen ist, so kann man oft aus der Betrachtung der Dimensionen die Potenz ermitteln. Näheres hierüber ist in Specialschriften nachzusehen*).

Verhältniss des elektrostatischen zum elektromagnetischen Maasssysteme. 274 Um das Verhältniss beider Maasssysteme zu übersehen, stellen wir zunächst aus den beiden Tabellen II. und III. die Dimensionen der fünf wichtigsten Grössen neben einander und suchen den Quotienten zwischen den Dimensionen je zweier gleichnamiger Grössen:

*) Neesen, Wiedem. Ann. VII, S. 329 (1878). Man vergleiche ferner: die zum vorigen Paragraphen angeführte Literatur.

Grössenart	Dimension im elektrostatischen System	Dimension im elektromagnetischen System	Quotient
Elektricitätsmenge	$\frac{l^{3/2} m^{1/2}}{t}$	$l^{1/2} m^{1/2}$	$\frac{l}{t} = v$
Stromstärke . . .	$\frac{l^{3/2} m^{1/2}}{t^2}$	$\frac{l^{1/2} m^{1/2}}{t}$	$\frac{l}{t} = v$
Capacität	l	$\frac{t^2}{l}$	$\left(\frac{l}{t}\right)^2 = v^2$
Potential	$\frac{l^{1/2} m^{1/2}}{t}$	$\frac{l^{3/2} m^{1/2}}{t^2}$	$\frac{t}{l} = \frac{1}{v}$
Widerstand . . .	$\frac{t}{l}$	$\frac{l}{t}$	$\left(\frac{t}{l}\right)^2 = \frac{1}{v^2}$

Da $\frac{l}{t}$ eine Geschwindigkeit vorstellt, wofür wir v schreiben, so ersieht man, dass alle Einheiten des einen Systems aus dem gleichnamigen des anderen dadurch hervorgehen, dass diese mit v oder dessen Quadrat multiplicirt oder dividirt werden.

Diese Zahl v hat ein hervorragendes Interesse, weil dieselbe nach einer von Maxwell entwickelten Theorie mit der Geschwindigkeit des Lichtes identisch sein soll (siehe folgenden Paragraphen). Um diese Grösse v zu bestimmen, muss man eine der in der ersten Columme aufgeführten Grössen nach beiden Maasssystemen messen. Der Quotient der Messungsresultate liefert dann v oder v^2 (oder deren reciproke Werthe). Es ergaben sich daher fünf wesentlich verschiedene Methoden, von welchen drei von verschiedenen Physikern in verschiedener Weise mit mehr oder weniger genauem Erfolge angewendet wurden.

Auf dem Vergleiche von Messungen der Elektricitätsmenge beruhten die von W. Weber und R. Kohlrausch*); sie ergaben:

$$v = 3{,}107 \,.\, 10^{10} \text{ (1856).}$$

Aus der vergleichenden Messung von Potentialen erhielten·

Thomson**) $v = 2{,}82 \,.\, 10^{10}$ (1869)
Maxwell***) $v = 2{,}88 \,.\, 10^{10}$ (1868)
M'Kichan†) $v = 2{,}93 \,.\, 10^{10}$ (1873)
Shida††) $v = 2{,}995 \,.\, 10^{10}$ (1881)
Fr. Exner†††) $v = 3{,}01 \,.\, 10^{10}$ (1882)

*) Elektrodynam. Maassbestimmung. Leipzig 1856. — **) Rep. Brit. Assoc. 1869. — ***) Wiedem. Lehre v. d. Elektricität IV, S. 994. — †) Ebend. S. 997. — ††) Ebend. S. 998. — †††) Wiener Akad. Ber. LXXXVI, S. 106 (1882). Dieser Werth von Klemenčič auf 2,92 . 10^{10} corrigirt.

Durch vergleichende Messung von Capacitäten erhielten.

Ayrton und Perry*)	$v =$	$2{,}980 \cdot 10^{10}$	(1879)
Klemenčič**) . . .	$=$	$\begin{cases} 3{,}0188 \cdot 10^{10} \\ 3{,}014 \cdot 10^{10} \end{cases}$	(1884—1886)
Stoletow***) .	$=$	$2{,}98 - 3{,}00 \cdot 10^{10}$	(1881)
S. J. Thomson†) . .	$=$	$2{,}963 \cdot 10^{10}$	(1883)
Colley	$=$	$3{,}09 \cdot 10^{10}$	(1885)
Himstedt††)	$=$	$\begin{cases} 3{,}0081 \cdot 10^{10} \\ 3{,}0074 \cdot 10^{10} \end{cases}$	(1886—1887)

Aus den mit besonderer Genauigkeit ausgeführten Versuchen von Klemenčič und Himstedt geht hervor, dass v mit grosser Wahrscheinlichkeit zwischen $3{,}003 \cdot 10^{10}$ und $3{,}014 \cdot 10^{10}$ anzunehmen ist, welcher Werth in der That mit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes nahe übereinstimmt.

Nehmen wir für v den abgerundeten Werth $3 \cdot 10^{10}$ an, so erhalten wir zur Vergleichung der elektrostatischen Maasse mit den elektromagnetischen des (C. Gr. S.)-Systems folgende Tabelle:

Elektricitätsmenge	1 elektromagn. Einheit	$=$	$3 \cdot 10^{10}$	elektrostat. Einh.
Stromstärke	1 „ „	$=$	$3 \cdot 10^{10}$	„ „
Capacität	1 „ „	$=$	$9 \cdot 10^{20}$	„ „
Potential	$3 \cdot 10^{10}$ „ „	$=$	1	„ „
Widerstand	$9 \cdot 10^{20}$ „ „	$=$	1	„ „

Zum Vergleiche der elektrostatischen mit den praktischen Einheiten:

1 Coulomb	$=$	$3\ 10^9$	elektrostat.	Einheiten der Elektricitätsmenge,
1 Ampère	$=$	$3 \cdot 10^9$	„	Stromeinheiten,
1 Farad	$=$	$9 \cdot 10^{11}$	„	Capacitätseinheiten,
1 Mikrofarad	$=$	$9 \cdot 10^5$	„	„
300 Volt	$=$	1	„	Potentialeinheit,
$9 \cdot 10^{11}$ Ohm	$=$	1	„	Widerstandseinheit.

Das Wesen der Elektricität. Nachdem wir bisher die elek- 275
trischen Erscheinungen in ihrem thatsächlichen Verlaufe beschrieben und die Gesetze derselben nachgewiesen haben, wäre es eigentlich zum Schluss unsere Aufgabe die Antwort auf die Frage zu geben: „Was ist die Elektricität?“

Trotzdem müssen wir die Antwort auf diese Frage schuldig bleiben, weil dieselbe bisher überhaupt noch nicht befriedigend gegeben werden

*) Phil. Mag. 1879; Wiedem. Beibl. 1879.

**) Wiener Akad. Ber. LXXXIX, S. 298 (1884); XCIII, S. 471 (1886).

***) Journ. de physique X, 1881.

†) Proc. Roy. Soc. 35, 1883; Wiedem. Beibl. 1883.

††) Wiedem. Ann. XXIX, S. 560 (1886); XXXIII, S. 1 (1888).

konnte. Ja, wir müssen es uns sogar versagen, auch nur die wichtigeren Untersuchungen über die Theorie der Elektricität hier zu besprechen, weil dies in populärer Weise nicht möglich ist. Zudem befindet sich dieser Gegenstand gerade jetzt durch die überraschenden Entdeckungen von H. Hertz im Stadium der Entwickelung, welche bis zu einem gewissen Abschlusse gelangen muss, bevor man deren Resultate in ein Lehrbuch aufnehmen kann. Wir müssen uns daher auf die nachfolgenden historischen Bemerkungen beschränken.

Bis zum Anfange dieses Jahrhunderts nahm man zur Erklärung der Licht- und Wärmeerscheinungen, der elektrischen und magnetischen Phänomene stoffliche Substrate, den Lichtstoff, Wärmestoff, die magnetischen und die elektrischen Fluida an, die man wegen ihrer Unwägbarkeit den wägbaren Stoffen oder Ponderabilien als Inponderabilien gegenüber stellte. Diese Vorstellung war zwar in Bezug auf den Lichtstoff schon durch die Huygens'sche Undulationstheorie des Lichtes in der Weise modificirt worden, dass man erkannte, dass das Wesen des Lichtes nicht in dem zu Grunde liegenden Aether selbst, sondern in der schwingenden Bewegung des Aethers begründet ist. Ebenso hat man erkannt, dass die leitbare Wärme nicht ein besonderer Stoff sei, sondern nur in der Bewegung der kleinsten Theile des wägbaren Stoffes bestehe, während man die strahlende Wärme ebenfalls auf Schwingungen des Aethers zurückzuführen vermochte, wie das Licht, von dem sie sich nur in physiologischer Beziehung unterscheidet.

Auch die Annahme einer stofflichen Natur der magnetischen und elektrischen Fluida ist längst aufgegeben, obwohl sie noch in der Ausdrucksweise festgehalten wird. Ausgehend von der Thatsache, dass wir unter Aufwand von chemischer, mechanischer und calorischer Energie elektrische Erscheinungen hervorrufen können, und dass umgekehrt durch Ausgleich elektrischer Spannungen und durch elektrische Ströme Wärme, chemische Zersetzungen und mechanische Energie hervorgebracht werden, ist man berechtigt, in den elektrischen Phänomenen die Erscheinung einer besonderen Form der Energie anzunehmen.

Es fragt sich daher zunächst, welches materielle Substrat der Träger dieser Energie ist und ob wir mit dem Namen „Elektricität" diesen Träger oder die Energie desselben bezeichnen wollen.

R. Clausius*) scheint den ersteren Standpunkt vertreten zu haben, indem er geltend machte, dass Niemand Elektricität in Wärme, oder umgekehrt verwandelt habe, sondern immer nur die Bewegung der Elektricität in Bewegung der Atome, d. i. Wärme, verwandelt werde. Nach dieser Auffassung wäre es also ebenso unrichtig zu sagen, die Elektricität wird in Wärme verwandelt, wie es unrichtig wäre zu sagen, der

*) „Ueber den Zusammenhang zwischen den grossen Agentien der Natur." Bonn 1885.

Lichtäther wird in Wärme verwandelt, wenn das Licht unter Erwärmung absorbirt wird, oder die bewegten Dampfmolecüle werden in mechanische Energie verwandelt, sobald sie auf den Kolben der Dampfmaschine wirken. Diese Auffassung würde es verbieten, die „Elektricität“ als eine mit Wärme und mit mechanischer Energie im Aequivalentsverhältnisse stehende Energieart zu bezeichnen.

Diese Auffassungsweise ist aber nicht allgemein üblich; viele Physiker gebrauchen den Ausdruck „Elektricität“ vielmehr in dem Sinne, dass sie damit die den elektrischen Erscheinungen innewohnende Energie bezeichnen. Selbstverständlich handelt es sich dabei nicht um Meinungsverschiedenheit in der Sache selbst, sondern um mangelnde Einhelligkeit in der conventionellen Bezeichnungsweise.

Was nun den materiellen Träger der elektrischen Energie betrifft, so sind im Laufe der letzten Jahre die Anhaltspunkte immer zahlreicher geworden, welche als solchen dasselbe Medium vermuthen lassen, welches den Erscheinungen des Lichtes und der strahlenden Wärme zu Grunde liegt, nämlich den Lichtäther. Wir können hierüber nur einige kurze Andeutungen geben.

Durch die Untersuchungen von W. Weber und R. Kohlrausch sind die von elektrischen Strömen ausgeübten elektrodynamischen Kräfte in eine bestimmte numerische Beziehung gebracht worden zu den elektrostatischen, also von der Bewegung unabhängigen Kräften. Man denke sich zwei gleichartige Elektricitätsmengen in parallelen Bahnen mit constanter Geschwindigkeit bewegt. Vermöge ihrer elektrostatischen Wirkung müssen sie sich abstossen; vermöge ihrer elektrodynamischen Einwirkung (als parallel strömende Elektricitäten) müssen sie sich anziehen. Die Untersuchungen der genannten Physiker haben nun ergeben, dass sich diese Wirkungen das Gleichgewicht halten, sobald die Geschwindigkeit $c = v\sqrt{3}$ ist, wobei v gleich der Geschwindigkeit des Lichtes 300 000 km per Secunde ist. v ist dieselbe Geschwindigkeit, welche in der Relation der elektrostatischen zu den elektromagnetischen Einheiten eine Rolle spielt. Diese Uebereinstimmung ist deshalb nicht als eine zufällige anzunehmen, weil sie auch in Bezug auf jene Werthe der Lichtgeschwindigkeit stattfindet, welche in stärker brechenden Medien beobachtet werden. In solchen Medien ist nämlich, wie die Beobachtung der Dielektricitätsconstanten lehrt, auch die elektrostatische Kraft, mit welcher zwei Elektricitätselemente auf einander einwirken, geringer als im Weltenraume, folglich muss auch die „kritische“ Geschwindigkeit, bei welcher die elektrodynamischen Kräfte der elektrostatischen gleich werden, entsprechend geringer sein.

Es ergeben sich hieraus Beziehungen zwischen dem Brechungsquotienten und der Dielektricitätsconstante, welche, so weit die bisherigen Messungen ersehen lassen, es bestätigen, dass die Geschwindigkeit der Elektricität in demselben Verhältnisse vermindert ist, wie die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes. Beachtet man hierzu noch

die Einflussnahme des magnetischen und elektrischen Feldes auf die Lichtbewegung, den Zusammenhang zwischen Durchsichtigkeit und Leitungsvermögen, den Einfluss des Lichtes auf die Entladung der Elektricität, die Elektrisirung von Metallplatten durch Belichtung (W. Hallwachs), endlich noch die Resultate der Untersuchungen von A. Kundt*) über die Uebereinstimmung des Temperaturcoëfficienten für die Lichtgeschwindigkeit in den Metallen mit dem Temperaturcoëfficienten ihres Leitungsvermögens für den galvanischen Strom, so wird man es als erwiesen bezeichnen müssen, dass die elektrischen Phänomene mit denen des Lichtes im innigsten Zusammenhange stehen und wahrscheinlich auf denselben Träger zurückzuführen sind.

Durch die oben erwähnten Entdeckungen von H. Hertz**), die wir hier nicht mehr eingehend besprechen können, ohne den Rahmen dieses Buches zu überschreiten, wurde zunächst die schon von Faraday ausgesprochene Anschauung bestätigt, dass die elektrischen Kräfte selbstständig im Raume bestehende Polarisationen sind, welche noch fortdauern, wenn die Ursachen, welche diese Kräfte weckten, bereits verschwunden sind. Sie haben ferner ergeben, dass die elektrodynamischen Wirkungen eine endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit besitzen, dass es im Luftraume elektrodynamische Transversalwellen giebt, welche sich mit einer der Geschwindigkeit des Lichtes verwandten Geschwindigkeit ausbreiten und dass demnach die Transversalwellen des Lichtes wahrscheinlich elektrodynamische Wellen sind. Es ist endlich H. Hertz gelungen, die Fortpflanzung, die Interferenz und die Polarisation elektrodynamischer Wellen im Luftraume, sowie ihre Reflexion an Metallwänden nachzuweisen.

Durch diese epochemachenden Entdeckungen gewinnt die von Maxwell auf Grund der Faraday'schen Vorstellungen ausgearbeitete, von H. Helmholtz weiter ausgebildete elektromagnetische Theorie des Lichtes an Wahrscheinlichkeit. Es ist den genannten Physikern gelungen, die Fortpflanzung der elektrischen und magnetischen Störungen auf dieselben Gleichungen zurückzuführen, welche für jene zweier aufeinander senkrechter Lichtschwingungen auf Grund der Annahme der Elasticität des Aethers abgeleitet wurden. Es ist mithin Hoffnung vorhanden, die Optik mit der Elektricitätslehre zu einer gemeinsamen Theorie zu vereinigen und alle physikalischen Erscheinungen auf die Bewegungen zweier Arten von Materie, der Atome und Molecüle der wägbaren Körper einerseits und des Aethers andererseits, zurückzuführen***).

*) „Ueber die Aenderung der Lichtgeschwindigkeit in den Metallen mit der Temperatur." Sitzber. der Berliner Akad. LII, S. 1387 (1888).

**) Wiedem. Annal. XXXIV, S. 155, 273, 551, 609 (1888); XXXVI, S. 1 (1889).

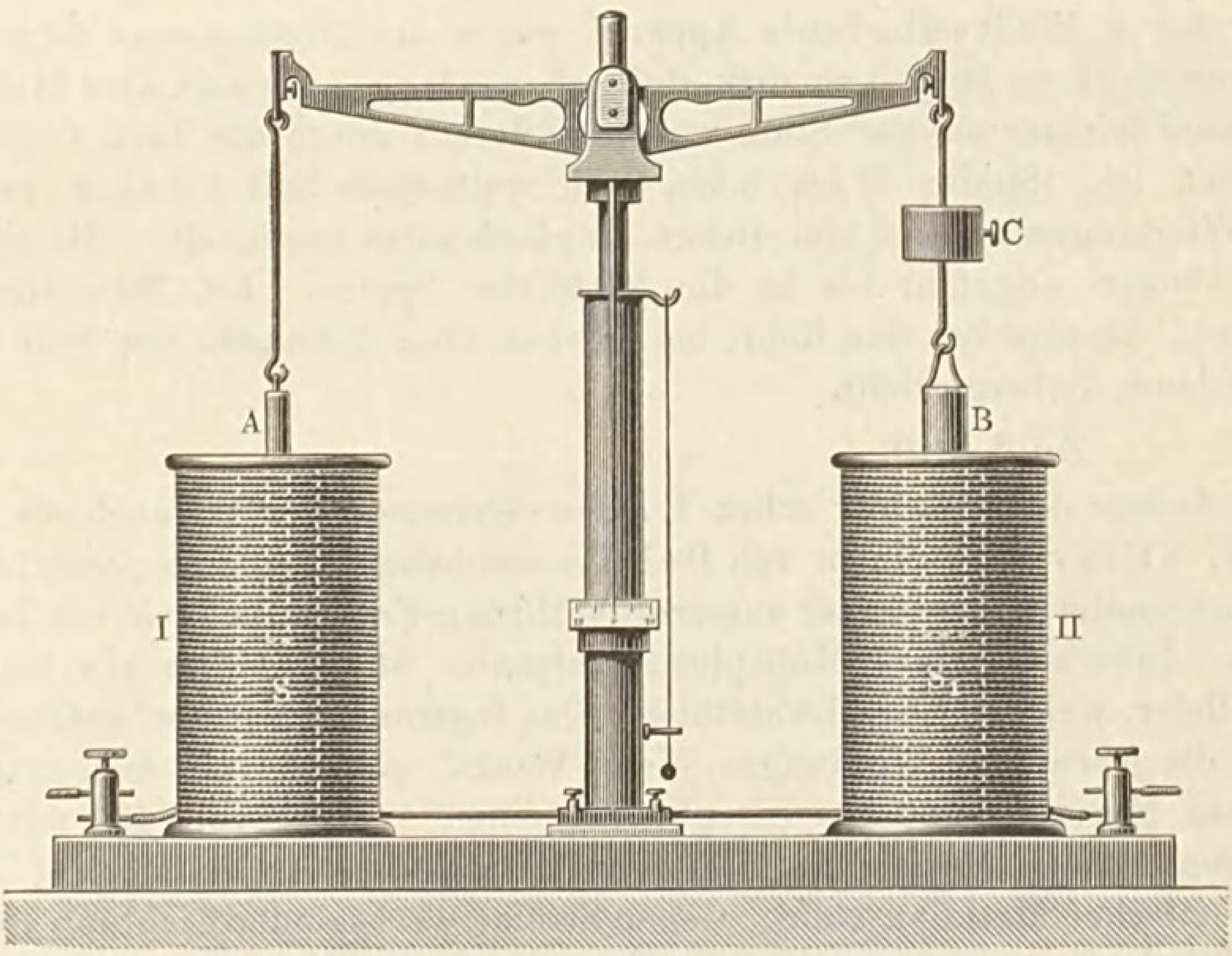
***) Eine zusammenhängende Darstellung der „elektromagnetischen Theorie des Lichtes" ist von O. Tumlirz, Leipzig 1883, veröffentlicht worden.

Nachträge.

Zu Seite 647 und Fig. 534:

Prof. A. v. Waltenhofen theilte uns gütigst mit, dass die nur schematisch gehaltene, aus Dingler's pol. Journal entnommene Abbildung Fig. 534 bei ihrer Ausführung zu Misserfolgen Anlass gegeben habe und

Fig. 891.

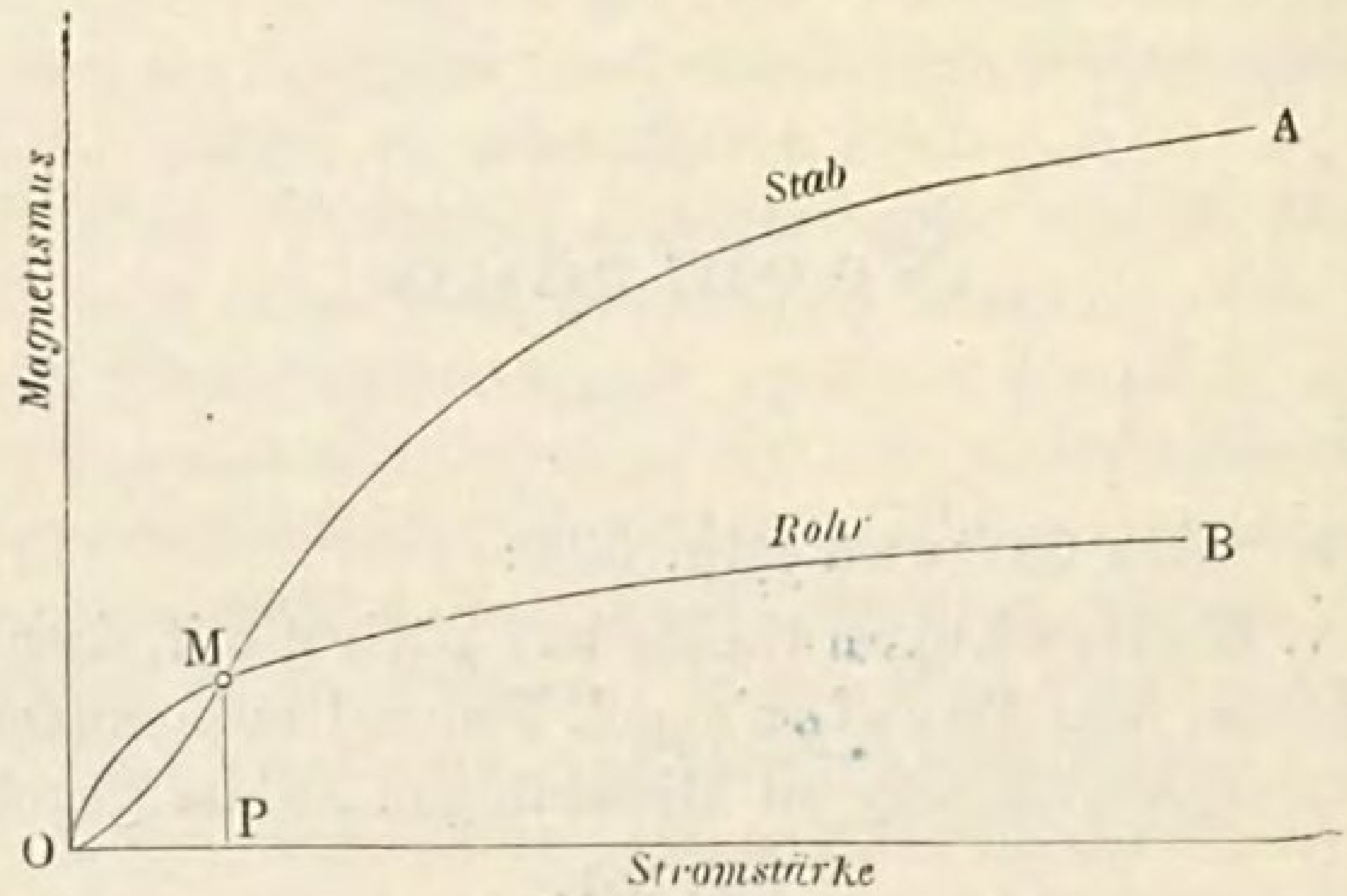


durch die nachstehende exactere Abbildung zu ersetzen wäre, Fig. 891. Dem entsprechend hätte auch der Text S. 647, Zeile 4 verbessert folgendermaassen zu lauten:

„Die von A. v. Waltenhofen beobachteten Gesetzmässigkeiten lassen erkennen, dass die Magnetismen eines weiten dünnwandigen Rohrs

(dargestellt durch die Ordinaten der Curve *B*, Fig. 892) unterhalb einer gewissen magnetisirenden Stromstärke (dargestellt durch die Abscisse *OP*) grösser, hingegen bei stärker magnetisirenden Kräften (über *OP* hinaus) kleiner sind, als die (durch die Ordinaten der Curve *A* dargestellten) Magnetismen eines massiven Stabes von beträchtlich grösserem Gewichte. Um dies zu demonstriren, hat v. Waltenhofen den in Fig. 891 abgebildeten Apparat construirt. S und S_1 sind . . .

Fig. 892.



An v. Waltenhofen's Apparat waren die Dimensionen folgende: Eisenstab 13 cm lang, 1 cm dick, Rohr ebenso lang, 2 cm weit, aber fünf- bis achtmal leichter als der Stab, welche Differenz durch die Tara *C* ausgeglichen ist. Spulen 17 cm hoch, 3 cm weit, jede mit 6 Lagen von je 40 Windungen eines 3 mm dicken Kupferdrahtes bewickelt. Die Cylinder hängen ungefähr bis in die Mitte der Spulen. Bei Stromstärken unter 1 Ampère hat das Rohr, bei solchen über 3 Ampère der Stab entschiedenes Uebergewicht.

Zu §. 219.

Ausser dem Weber'schen Elektro-Dynamometer ist noch ein von J. W. Giltay nach einem von Bellati ersonnenen Principe construirtes Dynamometer wegen seiner ausserordentlichen Empfindlichkeit von Interesse. Innerhalb eines Multiplicatorrahmens hängt bifilar ein Bündel paralleler, weicher Eisendrahtstücke. Das Instrument wird so aufgestellt, dass die Ebene der Windungen einen Winkel von 45⁰ mit dem magnetischen Meridian und das Eisenbündel einen Winkel von 45⁰ mit der Windungsebene bildet, so dass das Eisenbündel senkrecht auf dem magnetischen Meridian steht. Gehen Ströme wechselnder Richtung durch die Windungen, so magnetisiren sie das Eisenbündel mit wechselnden Polen und lenken dasselbe stets nach derselben Richtung ab. Für kleine Ablenkungen ist der Sinus des Ablenkungswinkels dem Quadrate der Stromstärke proportional. Diese Ablenkung wird in der gewöhnlichen Weise mittelst Planspiegel und Scalenfernrohr gemessen oder mittelst Hohlspiegel objectiv projicirt.

Das Instrument ist so enorm empfindlich, dass es schon durch die Ströme eines Telephons, in welches leise hineingesprochen wird, Scalenausschläge von 180 mm erfährt. Ein leises in das Telephon hineingerufenes *O* lässt die Scala bereits aus dem Gesichtsfelde verschwinden. Als Nachtheil des Instrumentes ist zu erwähnen, dass es keine Kupferdämpfung benutzen lässt, dass es empfindlich gegen Temperaturänderungen ist; ferner, dass es für constante Ströme nicht geeignet ist und auch nicht durch solche geaicht werden kann.

Näheres über dieses Instrument in Wiedemann's Beiblättern VII, S. 617. Wiedemann's Annalen XXV, S. 325.

Bayerische Staatsbibliothek München

ALPHABETISCHES SACH- UND NAMENREGISTER

DES

DRITTEN BANDES.

(Die Zahlen beziehen sich auf die Seiten.)

A.

Ablenkung der Magnetnadel durch den Strom 588.
Ablesefernrohr 39.
Absolutes Maass, magnetisches 61; elektrostatisches der Elektricitätsmenge 206; des Potentials 209; der Capacität 214; elektromagnetisches Maass der Stromstärke 400; des Widerstandes 419; der elektromotorischen Kraft 432 und 694.
Abstossung der Magnetpole 4.
Accumulator 502, 504.
Actinoelektricität 975.
Aepinus. Doppelstrich 12; Unitarische Theorie 133; Pyroelektricität 972.
Aequator, magnetischer 34.
Aldini. Entdeckung des Elektromagnetismus 589.
Ammeter 619.
„Ampère“, Stromeinheit 405.
Ampère. Ablenkungsregel 589; Gestell 714; elektrodynamisches Gesetz 831; Theorie des Magnetismus und Elementarströme 836.
Ampermeter 619.
Anelektrische Körper 125.
Anion 541.
Anker zum Hufeisenmagnet 17, der Dynamomaschine 771.
Anode 541.
Anomale Magnetisirung 634.
Ansammlungsapparat 229.
Anziehung der Magnetpole 4.
Aperiodischer Zustand 604.
Armatur 16, 771.
Armstrong. Dampfelektrisirmaschine 166.
Arons. 1014.
Arzberger. Elektrische Uhr 681.
Astasirung 603.
Astatische Nadel 592, a. Leiter 715.
Aureole 877.
Ausbreitungswiderstand 418.
Auslader 232, 264.
Avenarius. Einfluss der Temperatur auf Thermoelemente 936.
Axe, magnetische 6.

B.

Baille. Schlagweite 249.
Ballonelement 376.
Bancalari. 992.
Bandspirale 626.
Barlow. Gleichheit der Stromstärke längs eines Leiters 410, Rädchen 699, 701.
Barus, C. Haltbare Magnete 10.
Batterie aus Flaschen 230, galvanische 381.
Baryum, elektrolytisches 547.
Becherapparat 369.
Becquerel. Contactwirkung zwischen Metallen und Flüssigkeiten 347; Leitungswiderstand von Flüssigkeiten 473; Farbenringe 576; Thermoelektrische Spannungsreihe 930; Drehung der Polarisationsebene 1014.
v. Beetz. Bifilarelektroskop 124; Demonstrationselektroskop 130; Contactversuch 332; Trockene Säule 364; Vibrationschronoskop 674.
Behrens. Trockene Säule 361.
Bell. Telephon 908.

Bellati. Elektrodynamometer 1048.
Bergmann, J. Inductionswage 912.
Bertin, 1008.
Bifilaraufhängung 113.
Bifilardynamometer 834.
Bifilarmagnetometer 110, 113, 116.
Bifilarrolle 832.
Bifilarwickelung 859.
Biot. Vertheilung des Magnetismus in Stäben 25; Erdmagnetismus 121.
Blättermagnet 770.
Blitz, Arten desselben 308; Wirkungen 309.
Blitzableiter 311, 318.
Blitzröhren 281.
Blitztafel 282.
Böttger. Harzkuchenrecept 158.
Bogenlicht 530.
Bogenlichtregulator (Bogenlampe) 532.
Bohnenberger. Säulenelektrometer 364.
Boltzmann. Dielektricitätsconstante 256; Theorie des Hall'schen Phänomens 926; Thermoelektricität 964.
Borchardt. Influenzmaschine 171; elektrische Zündung 276.
Borda. Erdmagnetismus 49.
Bosanquet. Dynamomaschine 798.
Braun, F. Astasirung durch eisernen Schutzring 604; Theorie der galvanischen Kette 581.
v. Breda. Galvanische Funken 528.
Bright, C. u. E. Inductor mit geschlossenem magnetischen Stromkreise 897.
Brown, J. Contactversuch 357.
Brückenvorrichtungen 464.
Brugmann. Inclination 52.
Brush. Ausgleichsschaltung von Dynamomaschinen 787.
Budde. Thermoelektricität 362, 366.
Buff. Wasserzersetzung 294; Contactversuch 347; Modification der Daniell'schen Kette 374; Multiplicator 597; Magnetisches Tönen 637; Parallele Ströme 824; Disjunctor 862.
Bunsen. Voltameter 394; Elektrolyse 548; Element 578; Thermoelement 934.
Bussole 30.

C.

Calcium, elektrolytisches 548.
Caldani. Wirkung der Elektricität auf Frösche 325.
Calorimotor 371.
Canton. Elektroskop 129; Pyroelektricität 972.
Capacität 138, 214; Einheit der Capacität 437.
Capacitätsversuch 348.
Capillarelektrometer 506.
Cascadenbatterie 258.
Caseli. Pantelegraph 666.
Casselmann. Bogenlicht 530.
Cavendish. Barometerleuchten.
Charakteristische Curve der Dynamomaschine 793.
Chemische Vorgänge in den Volta'schen Ketten 577.
Chemische Wirkungen des Stromes 541.
Chlorsilberkette 385.
Chromsäurekette 380.
Chronoskop, elektrisches 672.
Clamond. Thermosäulen 949.
Clausius, R. Temperaturcoëfficient des Widerstandes 426; Elektrolyse 569; Dynamomaschine 792; Kraftübertragung 814; Thermoelektricität 961; Wesen der Elektricität 1043.
Clerk und Bureau. Sonnenlampe 540.
Cohn, E. Thermoströme gespannter Metalle 942.
Collector 766.
Commutator 390.
Compass 32.
Compensationsmethode Poggendorff's 484.
Compensator 488, 619.
Compensator an der Wechselstrommaschine 807.
Compoundschaltung 787.
Condensator 233, 234, 871.
Contactbürsten 769.
Contacttheorie 354, 967.
Contactversuch 328.
Convection, elektrolytische 560.
„Coulomb" als Einheit der Elektricitätsmenge 406.
Coulomb. Gesetz der Einwirkung von Magnetpolen 24; Lage der Pole 26; Methode der Oscillationen 56; Torsionswage 50; Sitz der elektrischen Ladung 149, 150; Gesetz der elektrischen Fernwirkung 201.
Crookes. Fluorescenz des elektrischen Lichtes 882; Entladung in verdünnten Gasen 883; Apparate für das Verhalten des Glimmlichtes 885; bewegende Kraft des Glimmlichtes 887; Einfluss des Magnets auf Glimmlicht 891.
Cruikshank. Trogapparat 368.
Cunaeus. Leydener Flasche 229.
Curie. Piezoelektricität 975.
Cylinderinductor 742.
Czapski. Chemische Energie der Kette 583.

D.

Dämpfung 43, 602, 814.
Dampfelektrisirmaschine 166.
Dal Negro. Tragkraft 641; Motor 650.
Daniell. Kette 373, 433, 578; Elektrolyse 554, 578.
Daumius. Pyroelektricität 972.
Davy. Kette 383; Elektrolyse der Alkalien 545; Elektrolyse der Erden 547; Rotation des Flammenbogens 707.
Declination 29, 48.
Declinatorium 30.
De la Rive. Polarlicht 321; chemische Theorie des Galvanismus 355; Galvanoplastik 572; Schwimmender Strom 717; Abstossung geradliniger Stromtheile 828; magnetischer Hammer 850; Rotation des Funkens um den Magnetpol 889.
Delibard und Delor. Blitzableiter 311.
Dellmann. Elektrometer 218.
Deprez. Charakteristik 793.
Diamagnetisirungszahl 1001.
Diamagnetismus 979, 990, der Flammen 992, der Krystalle 1002.
Diamagnetometer 989.
Dianenbaum 557.
Dichte der Elektricität 153.
Dielektricitätsconstante 255.
Dielektrische Körper 147.
Differentiallampe 537.
Differentialstrom 753.
Dimensionsformeln 1038.
Disjunctor 862.
Divisch Procop. Blitzableiter 311
Domalip. Magnetisirung 630.
Doppelstrich 12.
Dove. Schliessungsextrastrom 857; Disjunctor 862.
Dub. Magnetisirung von Eisen 630.
Du Bois-Reymond. Geschichte des Galvanismus 327; Stromschlüssel 390; unpolarisirbare Elektroden 496 und 1021; Compensationsmethode 487; Compensator 488; Multiplicator 594; Astasirung, aperiodischer Zustand 604; Schlittenapparat 843; Gesetz der elektrischen Reizung 1018.
Duboscq. Bogenlichtregulator 532.
Dufay. Entdeckung zweier Elektricitätsarten 127; menschlicher Körper als Leiter 136.
Dufour. Einfluss der Wärme auf Magnete 29.
Duhamel. Magnetisirungsmethode 11.
Duplicator von Varley 181; von Thomson, W. 185.
Drehung der Polarisationsebene durch magnetische Kräfte 1004.
Drehwage 57.
Dynamoelektrisches Princip 780.
Dynamomaschine 779, 790.
Dynamometer 802.

E.

Edelmann. Magnetometer 41; Inclinometer 52; Quadrantenelektrometer 226; Spiegelgalvanometer 606.
Edison. Vacuumlampe 522; Mikrotasimeter 917; Pyromagnetischer Motor und Stromgenerator 977.
Edlund. Galvanischer Lichtbogen 528; Schliessungsextrastrom 857; Theorie der galvanischen Kette 581.
Egger, M. Elektromagnetischer Motor 656.
Ei, elektrisches 284.
Eisenbahn, elektrische 813.
Eisenlohr. Widerstandssäule 430.
Elektricität 123, 132, 1042; Princip der Erhaltung der Elektricität 134; Fortpflanzung der Elektricität 289; atmosphärische E. 300; E. bei Gewittern 307.
Elektricitätsentwickelung in Krystallen 972.
Elektricitätsmenge 206.
Elektrische Eisenbahn 813.
— Endosmose 567.
— Fische 1023.
— Kerze 541.
— Kraftübertragung 809.
Elektrisirmaschine 160, 164.
Elektrisirung durch Reibung 123; durch Mittheilung 134; durch Influenz 139.
Elektroden 495, 541.
Elektrodynamisches Gesetz 831.
Elektrodynamometer 832, 1048.
Elektrolyt 541.
Elektrolytische Convection 560.
Elektrolytisches Gesetz 558.
Elektrolyse 541, 544; der Alkalien 545; der Chlormetalle 547; gelöster Salze 554; Theorie 544, 568; Anwendung 572.
Elektrometer 129, 218, 226, 305.
Elektromagnet 621.
Elektromagnetische Motoren 649, 723.
Elektromagnetisches Verhalten des Stahls 632.
Elektromagnetismus 588, 626.
Elektromotorische Kraft 334, 432, 489, 697.
Elektroskop 123, 128.

Elektrophor 157.
Elementarmagnete 21.
Elias. Magneteisenstein 10, Magnetisirungsspirale 625.
Energie des Magneten 14; des Stromes 516.
Entlader 230.
Entladung 289, 293, 294.
Entladungsrückstand 252.
Entladungsschlag 264.
Erdinductor 751.
Erdmagnetismus 51; Horizontalcomponente desselben 101; richtende Kraft 35; Ursache desselben 121.
Erdplatte 662.
Ermann. Atmosphärische Elektricität 302.
Ermann u. Simon. Elektrolyse 545.
Ettingshausen, A. v. Elektromotorische Kraft von Normalelementen 434; Apparat für Ampère'schen Versuch 832; Hall's Phänomen 923; Galvanometrische Temperaturdifferenz 970; Widerstandsänderung durch magnetische Kräfte 971; Diamagnetismus 1001.
Ettingshausen, A. v., und Nernst. Hall's Phänomen 921; Thermomagnetischer Effect 967.
Exner, Franz. Atmosphärische Elektricität 304; Elektrometer 305; Capacitätsversuch 348; Polarisation 494, 496; Unipolare Induction 713; Verhältniss der Maasssysteme 1041.
Extrastrom 854.

F.

Faè. Widerstandsänderung durch magnetische Kräfte 971.
„Farad", Capacitätseinheit 437.
Faraday. Kraftlinien 69; Sitz der elektrischen Ladung 152; Elektricität im Innern 211; Dielektricität 255; chemische Wirkung der Entladung 295; Elektrolyse 541, 547; elektrolytisches Gesetz 558; Inductionsregel 687; Rotationsapparat 703; Funkenmagnet 728; Erdinduction 754; Induction in rotirender Scheibe 817; Abstossung geradliniger Stromtheile 829; Voltainduction 841; Extrastrom 854; Ringmagnet 897; Diamagnetismus 979; Drehung der Polarisationsebene 1004.
Farbaky u. Schenek. Accumulatoren 505.
Faure. Accumulator 504.
Fechner. Säulenelektrometer 365; Gleichheit der Stromstärke längs eines Leiters 410; Constantenbestimmung an galvanischen Ketten 482.
Feddersen. Versuche mit Funken 289.
Feilitzsch. Vertheilung des Magnetismus im Querschnitt 643; Hall's Phänomen 917.
Feld, magnetisches 62.
Feldmagnete 771.
Ferraris, G. Transformator 902.
Fessel. Unipolare Induction 711.
Fizeau. Bogenlicht 531; Condensator 871.
Flachringmaschine 782.
Flaschenelement 383.
Flaschenresiduum 253.
Fleeming. Normalelement 375.
Flugrad 200.
Fluida, elektrische 132; magnetische 20.
Folgepunkte an Magneten 12.
Foucault. Bogenlicht 531; Regulator 532; Inductionsströme 814; Interruptor 869.
Frankenheim. Thermoströme 954.
Franklin. Elektroskop 129; Unitarische Theorie 133; Tafel 233; Cascadenbatterie 258; Atmosphärische Elektricität 300.
Freyberg. Capacität der Schachtelbatterie 230.
Friedel. Thermoelektricität der Krystalle 973.
Frick. Harz- und Glaselektricität 128; Magnetisirung durch den Strom 626.
Frölich. Stromcurve 798.
Froment. Elektromagnetischer Motor 654.
Fromme. Anomale Magnetisirung 634.
Funken, elektrischer 135, 280, 285; galvanischer 524.
Funkeninductor 867, 874.
Funkenmagnet 728.
Funkenmikrometer 248.
Funkenzündung 878.

G.

Galvani, L. Entdeckung des Galvanismus 325; Thierversuch 1017.
Galvanische Versilberung, Vergoldung etc. 575.
Galvanismus 324.
Galvanographie 574.
Galvanokaustik 521.
Galvanomagnetische Temperaturdifferenz 967.
Galvanometer 597.
Galvanoplastik 572.

Galvanoskop 591.
Ganz u. C. Wechselstrommaschine 807.
Garthe. Gekreuzte Ströme 827.
Gasbatterie 497.
Gaskohle 379.
Gassiot. Funkenbatterie 525; Röhre 880; Stern 883; alternirende Entladungen 893.
Gaugain. Tangentenbussole 598; Einfluss der Temperatur auf die Thermoelemente 935; Thermoelektricität des Turmalins 973.
Gaulard und Gibbs. Transformator 898.
Gauss. Magnetometer 37, 42; Ocular 46; Kraftwirkung von Magneten auf einander 96; Horizontalcomponente des Erdmagnetismus 101; Theorie des Erdmagnetismus 121.
Gauss und Weber. Telegraph 657.
Geissler'sche Röhren 284, 880.
Gerland, E. Fixirung der Kraftlinien 90.
Gewichtsvoltameter 398.
Gilbert. Einfluss der Wärme auf Magnete 28, 29.
Giltay, J. W. Elektrodynamometer 1048.
Gintl. Theorie des Kathodenlichts 888.
Glimmlicht 881; Schatten desselben 886; Strahlen desselben 883; bewegende Kraft desselben 887; Wärmeeffect 888.
Glockenspiel, elektrisches 196.
Glühen, galvanisches 518.
Glühlicht 522.
Gockel. Chemische Energie der Kette 583.
Goldhammer. Widerstandsänderung durch magnetische Kräfte 971.
Gore. Hall's Phänomen 917.
Gray. Entdeckung der Leiter der Elektricität 125.
Graham. Variation des Magnetismus 48.
Gramme, Z. T. Ringmaschine 762, 769, 782.
Grätz. Capillarelektrometer 509.
Greiss. Magneteisenstein 10; Elektrisirung durch Reibung 131.
Green. Potential 64.
Grotthus. Theorie der Elektrolyse 544, 569.
Grotrian. Leitungsvermögen von Flüssigkeiten 475; Elektrolyse 572.
Grove. Element 376, 578; Gasbatterie 497.
Guericke, O. v. Elektrischer Funken 136.
Gusseisen, magnetisches 11
Gyrotrop 390.

H.

Häcker. Tragkraft der Magnete 19; Schwingungsdauer derselben 27.
Hagenbach, v. Dynamomaschine 792.
Halbleiter 126.
Hall's Phänomen 917.
Hallwachs, W. Contactversuch 333, Accumulatoren 506; Einwirkung des Lichtes auf elektrische Ladungen 895.
Hammerl, H. Kupfervoltameter 399.
Handregulator für Bogenlicht 532.
Hankel. Thermoelektrische Spannungsreihe 930; Thermoelektricität der Krystalle 972.
Hankel und Dub. Wirkung von Stromspiralen auf Magnete und Eisen 646.
Hansteen. Erdmagnetismus 121.
Hare. Calorimotor 371.
Hartmann, G. Inclination 34.
Hasler. Registrirapparat 671.
Haüy'scher Stab 604.
Hauk. Kraftlinien 90.
Hawkins' Element 384.
Hefner-Alteneck, v. Bogenlichtregulator 537; Trommelinductor 746; Dynamometer 803.
Heintz. Anomale Elektrisirung des Glases 131.
Helmholtz, H. v. Anwendung der Magnete zu magnetischen Messungen 112; Contacttheorie 354; Calomelelement 384; elektrolytische Convection 561; Wärmeentwickelung in der galvanischen Kette 582; Tangentenbussole 598; elektromagnetischer Motor 652; Miographion 674; Induction 844.
Hempel, W. Hochdruckinfluenzmaschine 195.
Henley. Elektrometer 165; Auslader 264.
Henry. Inductionsströme höherer Ordnung 902.
Hermann. Muskelstrom 1020.
Hertz, H. Einwirkung des Lichtes auf die Entladung 894; wellenförmige Fortpflanzung, Reflexion etc. der Elektricität 1042, 1044.
Himstedt. Verhältniss des elektrostatischen und elektromagnetischen Maasssystems 1041.
Hittorf, W. Elektrolyse 553, 555, 563; Entladungen in verdünnten Gasen 883; geradlinige Ausbreitung des Glimmlichts 884; Einfluss des Magneten auf letzteres 891.
Hipp. Chronoskop 673; elektrische Uhr 677.

Hochdruckinfluenzmaschine 195.
Hoffer. Magnetisirungsmethode 13.
Hofmann, A. W. Elektrolyse des Wassers 542; elektrolytische Apparate 559.
Holz, A. L. Coërcitivkraft von Magneteisenstein 634.
Holtz, W. Influenzmaschine 170.
Hopkinson. Residuum 254; charakteristische Curve 793.
Horsford. Leitungswiderstand von Flüssigkeiten 474.
Houston, E. J. und Thomson, E. Thermomagnetischer Motor 976.
Hufeisenmagnet 16, dessen Tragkraft 19.
Humboldt, A. v. Elektrolyse 542.
Hughes. Drucktelegraph 659; Inductionswage 912; Mikrophon 913.
Hydroelektrisirmaschine 167.
Hygroelektrometer 166.

I.

Idioelektrische Körper 125.
Inclination 33, 52.
Inclinatorium 34.
Inclinometer 52.
Induction, unipolare 709; dynamoelektrische 841; durch Flaschenentladung 852.
Inductionscoëfficient 95, 844.
Inductionsconstante 847.
Inductionsfreie Wickelung 859.
Inductionsfunken in verdünnten Gasen 879.
Inductionsgesetz Neumann's 844.
Inductions-Inclinatorium 756.
Inductionspendel 815.
Inductionsregel von Faraday 687, von Maxwell 723.
Inductionsströme 685, 848; höherer Ordnung 902.
Inductionswage 912.
Inductorium 862.
Influenz 139.
Influenzapparat 140.
Influenzmaschine 171.
Integralstrom 753.
Intensität des Erdmagnetismus 21; eines magnetischen Feldes 61, 840, 994.
Intensitätsvariometer 117.
Interruptor 869.
Inversor 390.
Isenbeck. Dynamomaschine 775.
Isodynamen 118.
Isogonen 118.
Isoklinen 118.
Isolator 125.
Isolirschemel 196.

J.

Jacobi. Stromeinheit 392; Widerstandseinheit 417; Galvanoplastik 572; elektromagnetischer Motor 651.
Jacquin. Eektrolyse 545.
Jablochkoff. Elektrische Kerze 541.
Jahn, H. Joule's Gesetz für Elektrolyte 513; chemische Energie der Kette 538.
Jamin. Blättermagnet 19; Bogenlampe 541.
Jaumann. Kugelelektrometer 229.
Jedlicka. Elektromagnetischer Motor 650.
Joule. Gesetz der Wärmeentwickelung durch den Strom 509; giltig für Elektrolyte 513; Magnetisirung durch den Strom 627; Verlängerung durch Magnetisirung 638.
„Joule", Praktische Einheit der Energie 517.
Jobart. Vacuumlampe 522.
Jonen 541.

K.

Kalium, elektrolytisches 546.
Karten, magnetische 118.
Kathode 541.
Kathodenraum 883.
Kathodenstrahlen 884.
Kation 541.
Kerr. Reflexion an Magneten 1016.
Kessler. Versuch mit Eisenfeile 18.
Ketten, constante 371.
Kienmayer. Amalgam 131.
Kinnersley. Elektrischer Thermometer 269.
Kirchhoff. Stromverzweigung 444; Brücke 468.
Kittler. Elektromagnetische Kraft des Daniell'schen Elementes 433.
Kleist. Flasche 229.
Klemenčič. Verhältniss des elektrostatischen und elektromagnetischen Maasssystems 1041.
Klemmschrauben 388.
Klemmenspannung eines Elements 446; einer Dynamomaschine 788, 792.
Knoblauch. Diamagnetismus 1003.
Kobell. Galvanographie 574.
Kohlrausch, Fr. Winkelmessung mit Spiegel und Scala 40; Bifilarmagnetometer 110; Bifilaraufhängung 114; Intensitätsvariometer 117; Voltameter 396; elektrochemische Aequivalente 407; Verzweigungsrheostat 460; Brücke 470; Leitungsvermögen der Flüssig-

keiten 474, 475; Elektrolyse des Wassers 544; Theorie der Elektrolyse 565, 572; Spiegelgalvanometer 612; Federgalvanometer 620; Anwendung des Telephons zu Widerstandsmessungen 911; Thermoelektricität 965.
Kohlrausch, R. Elektrometer 220; Condensator 237.
Kraftlinien eines Poles 69; zweier Pole 78; eines homogenen Feldes 82; eines Magnets im erdmagnetischen Felde 85; Darstellung und Fixirung der Kraftlinien 90; Kraftlinien der Ströme 820; eines Stromkreises, Solenoides 822.
Kraftübertragung, elektrische 809.
Kravogl. Elektromagnetischer Motor 724; Dynamomaschine 780.
Kreisstrich 13.
Kreisstrom, magnetisches Moment desselben 839.
Křižik und Piette. Differentiallampe 539.
Kugelelektrometer 228.
Kugeltanz, elektrischer 195.
Kundt. Influenzmaschine 186; Pyroelektricität 975; Gesetz der elektromagnetischen Drehung der Polarisationsebene 1016.
Kundt'sche Constante 1015.
Kupfervoltameter 399.
Kupffer. Einfluss der Wärme auf Magnete 28.
Kuschel. Elektrolyse 565.

L.

Ladungssäule, Ritters 491.
Lamont. Magnetischer Theodolit 44; Inklination 52; magnetische Intensität 109; Registrirapparat 670; Magnetisirungstheorie 798.
Lane'sche Flasche 246.
Lang, V. v. Constantenbestimmung an galvanischen Ketten 483; galvanische Lichtbogen 528; Spiegelgalvanometer 613.
Latimer Clarke. Normalelement 383, 434.
Leclanché. Element 384, 579.
Leduc. Drehung der Isothermen im Magnetfelde 971.
Leiter der Elektricität 125; Leiter 1. Ordnung 344; Leiter 2. Ordnung 346.
Leitungsvermögen 420.
Leitungswiderstand 415; specifischer 416, 420; der Legirungen 423; der Flüssigkeiten 473; des reinen Wassers 479.
Lemström. Polarlicht 322.
Lenz. Wärmeentwickelung durch den Strom 510; Anomalie der Magnetisirung 630; Reciprocität zwischen Bewegung und Inductionsstrom 698.
Lenz und Jacobi. Gesetz der Magnetisirung 627; Tragkraft der Elektromagnete 641.
Le Roux. Thermoelektrische Kraft 939; Erwärmung der Löthstellen an Thermoelementen durch den Strom 957.
Leuner. Influenzmaschine 193.
Leydener Flasche 229; Theorie 228; Entladung 243; Schlagweite 248.
Leyser. Magnetometer 42.
Licht, elektrisches in verdünnten Gasen 284.
Lichtbogen, galvanischer 528.
Lichtenberg. Figuren 296.
Lichterscheinung bei elektrischer Entladung 280.
Linienbatterie 664.
Lippmann. Erhaltung der Elektricität 134; Kugelelektrometer 228; Capillarelektrometer 506.
Lissajous. Funken des Inductors 877.
Lithium, elektrolytisches 549.
Lloyd. Inclination 52.
Localbatterie 664.
Locke. Galvanische Uhr 668.
Lüdtge, R. Mikrophon 913.
Luftdämpfung 603.
Luggin. Galvanischer Lichtbogen 530.
Lullin's Versuch 265.

M.

Maasssysteme, Uebersicht 1027.
Mach, E. Kantenwirkung 155; Kugelelektrometer 228; Dielektricitätsconstante 257; Flaschenbatterieumschalter 262; Arbeitsmessung an Influenzmaschine 298; Blitzableiter 316; Hall's Phänomen 917.
Mach und Doubrava Durchbohrung von Glas 268.
Macfarlane. Schlagweite 251.
Magazin, magnetisches 18.
Magnesium, elektrolytisches 549.
Magnet 3; Haltbarkeit 10.
Magneteisen 3, 10.
Magnetelektrische Maschine 788.
Magnetische Pole 4, 25, 26.
— Kraftlinien 69, 78, 82, 85, 90; der Dynamomaschine 774.
Magnetisirung durch Influenz 6; durch den Strich 11; durch den Strom 621; anomale 634.

Magnetisirungsconstante 1001.
Magnetisirungszahl 1001.
Magnetinductor 728.
Magnetismus 3; freier, gebundener 8; permanenter 9; specifischer 634, 836; Theorie des Magnetismus 836.
Magnetkrystallaxe 1002.
Magnetnadel 4.
Magnetometer 37.
Magnetoinduction 683.
Magnetoinductionsgesetz 690.
Magnetstab. Vertheilung des Magnetismus 22.
Magnus. Versuch mit Eisenpulver 18; Einfluss der Untertheilung der Eisenkerne 859; Thermoströme 943.
Manipulator 658.
Marcus. Glühlampe 522; Thermosäule 945.
Marinegalvanometer 96.
Marrian. Magnetisches Tönen 636.
Mascart. Schlagweite 250.
Masson. Induction durch Flaschenentladung 852; Inductionsströme höherer Ordnung 905.
Matthiessen. Elektrolytisches Calcium 548; Thermoelemente 933.
Matthiessen und Hockin. Brückenvorrichtung 472.
Matteucci. Maximum des Leitungsvermögens 478; Torsion und Magnetismus 635; thierische Elektricität 1020.
Maxim. Vacuumlampe 523.
Maxwell. Kraftlinien 69; elektromagnetische Lichttheorie 1045.
Meidinger. Element 375.
Meissner und Meyerstein. Spiegelgalvanometer 610.
Melsens. Blitzableiter 316.
Meridian, magnetischer 30.
Mikrogalvanometer 614.
Mikrophon 913.
Mikrotasimeter 917.
Minotto. Element 376.
Mörser, elektrischer 269.
Mohr. Voltameter 395.
Molecularmagnete 21.
Moleyns. Vacuumlampe 522.
Moment, magnetisches 117.
Morse. Schreibtelegraph 659; Alphabet 661.
Moser. Erdmagnetismus 122.
Motoren, elektromagnetische 649.
Müller, H. W. Funkenbatterie 525.
Müller, J. Galvanisches Glühen 520; Magnetisirungsformel 627; Tragkraft 641; Drehung der Polarisationsebene durch magnetische Kräfte 1009.
Multiplicator 591.
Muskelstrom 1019.
Musschenbrock. Elektrische Fische 1024.
Myographion 674.

N.

Naccari und Bellati. Thermoelektricität 963.
Nadel, astatische 46; elektrische 124; des Elektrometers 224.
Nahrwold. Einfluss des Staubes bei elektrischen Entladungen 199.
Natrium, elektrolytisches 549.
Nebel. Galvanischer Lichtbogen 530.
Nebenschlussschaltung 786.
Nervenerregung durch den Strom 1018.
Neumann, F. E. Inductionsgesetz 844.
Nicholson. Duplicator 181, 187.
Nicholson und Carlisle. Elektrolyse 542.
Nippoldt. Telephonbrücke 912.
Niveaufläche, magnetische 68; elektrische 136.
Niveaulinie 69, 74.
Nobili. Farbenringe 576; Multiplicator 592; Thermosäule 944; Muskelstrom 1019.
Noë. Thermosäule 945.
Nordlicht 319.
Nordpol, magnetischer 5.
Normal-Daniell 374.
Normalelement 434.
Normalschaltung 784.
Normann, R. Inclination 34.
Nullpunkt absoluter des Potentials 307.
Nutzeffect der magnetelektrischen Maschine 789.

O.

Oberbeck. Magnetisirung eines Eisenrings 632; Inductionswage 912.
Oeffnungsschlag 854.
Oersted. Elektrometer 222; Entdeckung des Elektromagnetismus 588.
Ohm's Gesetz 412, 437; Ohm's Methode der Constantenbestimmung an Ketten 480.
„Ohm" als Widerstandseinheit 419.
Ostwald. Potentialdifferenz beim Contact 360.
Ozon 295, 545.

P.

Paalzow. Alternirende Entladung 893.
Pachytrop 389, 732.
Paccinotti. 762, 769.

Page. Magnetisches Tönen 636; Elektromagnetischer Motor 723; Inductor 867.
Palmieri. Tellurischer Inductionsapparat 754.
Pantelegraph 666.
Parallele Ströme 820.
Paramagnetisch 379.
Passivität des Eisens 498.
Päts van Troastwyck. Wasserzersetzung 294.
Peclet. Spannungsreihe 343.
Peltier. Elektrometer 222; atmosphärische Elektricität 304; thermoelektrischer Versuch, Kreuz, Effect 950, 961.
Pendel, elektrisches 123.
Permeabilität, magnetische 94.
Peukert. Galvanischer Lichtbogen 530.
Pfaff. Spannungsreihe 343.
Pfaundler. Voltameter 396; Apparat zu Joule's Gesetz 510; Theorie der Elektrolyse 569; automatischer Inductionszeiger 687; Apparate für Magnetinduction 691; Apparat zur Demonstration der Paccinotti-Gramme Maschine 772; Magnetische Kraftlinien der Dynamomaschine 774; Anwendung des dynamoelektrischen Princips auf Kravogl's Motor 780; Akustischer Tourenzähler 801.
Photoelektricität 975.
Picard. Barometerleuchten.
Piezoelektricität 975.
Pincus. Element 384, 579.
Pistole, elektrische 196.
Pixii. Magnetinductor 728.
Planté. Secundäre (Polarisations-) Batterie 494, 502; rheostatische Maschine 503.
Plücker. Glimmlicht 890; Diamagnetismus 984, 994, 1003.
Plücker und Fessel. Rotationsapparat 706.
Poggendorff. Spiegelablesung 37; Elektrisirung durch Reiben 131; Klemmen 388; Rheocord 429; Wippe 492; Multiplicator 592; Magnetisches Tönen 638; Rotation des Quecksilbers 708; Solenoid 838; magnetischer Hammer 851; Intermittenz des Inductorfunkens 880.
Poisson. Magnetische Hypothese 21.
Polarisation 489, 496.
Polarisirter Anker 679.
Polarlicht 319, 321.
Pole, magnetische 4.
Polschuhe 778.
Polstärke 61.
Potential, magnetisches 63; elektrisches 136, 209; auf sich selbst 212.
Potentialniveauflächen 66.
Pouillet. Chronoskop 675; Thermoelemente 929, 933.
Primäre Spirale 842.
Probekugel, Probescheibe 140.
Puluj. Unipolare Induction 713; Kathodenlicht 888.
Pyroelektricität 972.
Pyromagnetischer Motor und Stromgenerator 976.

Q.

Quadrantenelektrometer nach Henley 165; nach Thomson 222.
Quecksilbereinheit 417.
Quecksilberunterbrecher 852.
Quincke. Capillarconstante 507; Intensität eines Magnetfeldes 1010.
Quintus Icilius. Thermoströme 953.

R.

Raoult. Theorie der galvanischen Kette 581.
Receptor 626.
Reductionsfactor der Tangentenbussole 403, 408.
Registrirapparat 668.
Regnier. Glühlampe 522.
Regulator für Bogenlicht 532.
Reibungselektrisirmaschine 160.
Reibzeug 162.
Reis. Telephon 905.
Relais 664.
Remanenter Magnetismus 632.
Rheocord 429.
Rheoskop 591.
Rheostat 426, 805.
Rheostatische Maschine 503.
Rheotom 849.
Richat und Blondlot. Cylinderelektrometer 228.
Richmann. Tod durch Blitz 312.
Riecke. Pyroelektricität 973.
Riess. Elektrisirung durch Reibung 132; Influenzapparat 139; Flaschenbatterie 230; Wärmewirkung der Entladung 272; Induction durch Flaschenentladung 852.
Righi. Hall's Phänomen 920; Widerstandsänderung durch magnetische Kräfte 971.
Ringanker 771.
Ringmaschine 762, 771.
Ritter. Ladungssäule 491; Elektrolyse 542.
Roget. Kraftlinien 80; Spirale 825.

Roiti. Transformator 902.
Romagnosi. Ablenkung der Magnetnadel durch den Strom 588.
Romas, M. Wolkenelektricität 301.
Romershausen. Elektromagnet 649.
Ross, Capitän. Magnetischer Pol der Erde 34.
Rosetti. Arbeitsmessung an Influenzmaschinen 298.
Rosenthal. Microgalvanometer 614.
Rotation eines Stromleiters um Magnet 701; eines Magnets um den Leiter 705; eines biegsamen Leiters 705; flüssiger Leiter 707; eines Magnets um seine Axe 709; eines Stromes durch den Einfluss eines anderen 830.
Rotationsmagnetismus 818.
Rowland. Hall's Phänomen 925.
Rühlmann. Bogenlampe 541.
Rückschlag 198.
Ruhmkorff. Durchbohrung von Glas 266; Commutator 624; Inductorium 867.
Ruths anomale Magnetisirung 634.

S.

Sättigungspunkt der Magnete **26.**
Säulenelektrometer 364.
Saturnsbaum 557.
Saugwirkung der Spitzen 156.
Saussure. Elektroskop 129.
Schachtelbatterie 213.
Schaltungsweisen der Dynamomaschinen 784.
Schatten, magnetischer 96.
Schilling. Magnetische Schirmwirkung 96; Telegraph 657.
Schirmwirkung des Eisens 95.
Schlagweite der Leydener Flasche 248.
Schliessungs- und Öffnungsstrom 862.
Schlittenapparat 843.
Schlüssel 662.
Schneebeli. Magnetisirung von Stahl 634.
Schönbein. Theorie des elektrischen Stromes 367; Polarisation 496; Passivität 500.
Schuckert. Flachringmaschine 732.
Schübler. Atmosphärische Elektricität 301.
Schumann. Peltier's Effect 952.
Schutzring 226.
Schwarzschreiber **665.**
Schweiger. 592.
Secundäre Spirale **842.**
Secundenerg 516.
Secundärelement 502.
Seebeck. Spannungsreihe 343; Elektrolyse 547; Thermoelektricität 927.
Selbstinduction 847, 854.
Serienschaltung, Serienmaschine 784.
Siemens, W. Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Elektricität 289; Element 376; Widerstandseinheit 417; Stöpselrheostat 430; Brücke 469; Capillarelektrometer 509; Glockenmagnet 608; Torsionsgalvanometer 614; Universalgalvanometer 616; Chronoskop 673; Cylinderinductor 742; Dynamoelektrisches Princip 780; elektrische Eisenbahn 813.
Siemens u. Halske. Bogenlichtregulator 535; Tangentenbussole 599; Sinusbussole 600; Fünfzigmagnetmaschine 751; Dynamomaschine 784; Rufapparat zu Telephon **910.**
Silbervoltameter 399.
Sinusbussole 599.
Sinuselektrometer 222.
Smee. Element 384, 578.
Sohncke. Atmosphärische Elektricität 307; Drehung der Schwingungsebene des natürlichen Lichtes durch Magnetismus 1016.
Sonnenlampe 540.
Sömmering. Telegraph **657.**
Solenoid 715.
Spannung der Elektricität **217.**
Spannungsreihe 343.
Spencer. Galvanoplastik **572.**
Specifischer Magnetismus 634.
Specifische Elektricitätswärme **963.**
Spiegelgalvanometer 601, 604.
Spinne, elektrische 196.
Spitzenwirkung 156.
Sprengen mittelst Funken **276.**
Stabmagnetismus 61.
Stahlmagnet 11.
Stefan, J. Magnetische Schirmwirkung 96, 776; Tragkraft 642; Theorie der Dynamomaschine 798; Thermoelemente 934, 945; thermomagnetische Motoren 976; günstigste Form der Magnetkerne 981.
Steinheil. Erdleitung 658.
Stöhrer. Wachstaffetcondensator 234; Bunsenelement 378; Bogenlampe 536; Magnetoinductionsmaschine 729; Elektromagnetischer Motor und Inductor 736, 872; gekreuzte Ströme 827.
Stöpselrheostat 430.
Störungen, magnetische **47.**
Strich, magnetisirender 11.
Strouhal. Haltbare Magnete **10.**
Strom, elektrischer 366.
Stromcurve der Dynamomaschine **795.**
Stromdichte 541.
Stromeffect 516.
Stromeinheit 400.
Stromenergie **516, 581.**

Stromgenerator 809.
Strommessung 405.
Strompotential 844.
Stromreceptor 809.
Stromschlüssel 390.
Stromspirale 644.
Stromverzweigung 454.
Stromwender 390.
Sturgeon. Einfluss der Untertheilung der Eisenkerne 859.
Südpol, magnetischer 5.
Sulzer. Geschichte des Galvanismus 325.
Swan. Vacuumlampe 523.
Symmer. Dualistische Theorie 133.

T.

Tachometer 801.
Tangentenbussole 404, 597
Tauchbatterie 381.
Telegraphie 657.
Telephon 905.
Telephonbrücke 911.
Temperaturcoëfficient des Widerstandes 425, 478.
Temperaturmessung mittelst Thermoelementen 940.
Theodolit, magnetischer 44.
Thermoelektricität 927; der Flammen 959; Theorie 960.
Thermoelektrische Curven 939; Kraft 937; Spannungsreihe 929.
Thermoelektrisches Pendel 977; Rad 977; Verhalten der Legirungen 934.
Thermoelement 928.
Thermomagnetischer Effect 967; Motor 976.
Thermosäule 944.
Thermoströme 941, 958.
Thierische Elektricität 1016.
Thompson, S. Erhaltung der Elektricität 134; Schaltung der Dynamomaschine 787; Theorie der Dynamomaschine 797; Transformator 902.
Thomson, W. Marinegalvanometer 96; Tropfencollector 157; Duplicator 185; Quadrantenelektrometer 222; absolutes Elektrometer 226; Contactversuch 333; Brücke 471; Theorie der Kette 581; Thermoelektricität 936, 937, 942; specifische Elektricitätswärme 963; Thomsoneffect 964; Aenderung des Leitungsvermögens durch Magnetismus 971.
Thonzellen 372.
Töne beim Magnetisiren durch den Strom 636.
Toepler. Magnetische Wage 110; Influenzmaschine 171, 181; Schachtelbatterie 230; Blitzableiter 317; Luftdämpfung 603.
Tollinger. Leitungsvermögen von Flüssigkeiten 475.
Tomlinson, Aenderung des Widerstandes des Magnetismus 971.
Torsion und Magnetismus 635.
Torsionsgalvanometer 614.
Torsionskopf 43, 57.
Torsionskreis 115.
Torsionsverhältniss 104.
Torsionswage 57.
Tourenzähler 800.
Tragkraft 19, 639.
Transformationscoëfficient der Dynamomaschine 812.
Transformator 860, 895.
Transmissionsdynamometer 802.
Trogapparat 368.
Trommelmaschine 746.
Tumlirz. Diamagnetismus des Bergkrystalls 1003; elektromagnetische Lichttheorie 1045.
Tyndall. Diamagnetismus 986.

U.

Ueberführung der Flüssigkeit des Elektrolyten 566.
Ueberführungszahl 565.
Uhren, elektrische 676.
Unipolare Induction 709.
Universalgalvanometer 614.
Universalmagnetometer 117.
Unpolarisirbare Elektroden 1021.
Unterbrechungsrad 850.
Unterbrechungsvorrichtung 849.

V.

Vacuumglühlampe 522.
Van Marum. Elektrisirmaschine 283.
Variationen, magnetische 47, 112.
Varley. Duplicator 181.
Vaselinöl als dämpfende Flüssigkeit 536.
Verdet'sche Constante 1012.
Vertheilung, elektrische 139; des Magnetismus im Querschnitt 643.
Verticalgalvanometer 591, 595.
„Volt", Einheit der elektromotorischen Kraft 433.
Volta, Alex. Elektroskop 129; galvanische Versuche 327; Contactversuch 328; Spannungsreihe 343; Becherapparat 369.
Voltainduction 841.
Voltameter 392.
Voltampère 517.

Volta'sche Säule 357.
Volta's Element 358.
Volt-Coulomb 517.
Vorsselmann de Heer. Telegraph 657.

W.

Wärme, Einfluss auf Magnete 28; Wirkung auf Elektrisirung 127; entwickelt durch Laden von Flaschen 272; entwickelt durch den Strom 509.
Wagner's magnetischer Hammer 850.
Walsh. Elektrische Fische 1024.
Waltenhofen, A. v. Glasplattendurchbohrung 267; Lichtenberg's Figuren 297; Bunsenelement 379; Daniell's Element 433; Leitungsvermögen von Thermalwasser 480; Compensationsmethode 487; Accumulatoren 505; Galvanisches Glühen von Drähten 521; Torsionsgalvanometer 616; Magnetisirungsformel 630; Magnetisirung von Eisenpulver 632; Magnetisirung von Stahl durch den Strom 633; Remanenter Magnetismus, anomale Magnetisirung 634; Tragkraft 641; Stromwage 647, 1045; Schweben von Magneten in Spiralen 648; zur Geschichte der Dynamomaschine 780; Theorie der Dynamomaschine 797; Inductionspendel 815; elektrische Zündung 878; Thermoströme 948; Thermoelektricität 966.
Wanderung der Ionen 563.
Warren de la Rue. Chlorsilberbatterie 385, 525.
Wassmuth. Magnetisirungsarbeit 16; Astasirung 604.
Wassertropfenduplicator 185.
Wasserzersetzung 294, 541.
„Watt“ als Einheit des Effects 517.
Weber, H. F. Selbstinduction bifilargewickelter Spulen 859.
Weber, W. Molecularmagnete 21; Stromeinheit 401; Tangentenbussole 404, 597; Widerstandseinheit 419, 758; Unipolare Induction 710; Inductionsniclinatorium 755, 756; Spiegelgalvanometer 604; Elektrodynamische Messungen 832; Diamagnetismus 989, 990.
Wechselwirkung zwischen Magneten und Stromleitern 883.
Wechselwirkung zwischen Strömen und Stromleitern 820.
Weinhold. Elektrische Fundamentalversuche 128; Rufapparat zum Telephon 910; Mikrophon 914.
Werdermann. Glühlampe 522.
Werthheim. Torsion und Magnetismus 635; Magnetisches Tönen 636.
Wetteren, N. van. Magnete 19.
Widerstandscapacität 475.
Widerstandseinheit 417 bis 419; absolute 758; Widerstandsetalon 417.
Wiedemann, E. Elektrische Entladung in verdünnten Gasen 883; Theorie des Kathodenlichtes 888.
Wiedemann, E. und Ebert H. Einwirkung des Lichtes auf die Entladung 894.
Wiedemann G. Beseitigung von Ozon 195; Elektrolyse 555, 567, 572; Spiegelgalvanometer 606; Torsion und Magnetismus 635; Diamagnetismus 996, 1003, 1009.
Wiedemann, G. und Weiske. Wanderung der Ionen 563.
Wheatstone. Funkendauer 276; Rheostat 428; Brücke 464; Constante von Ketten 482; Chronoskop 672.
Wild. Thermoströme 958; Unipolare Erwärmung 959.
Wilde. Inductionsmaschine 744.
Wilke. Elektrophor 157.
Williamson. Elektrolyse 569.
Wind, elektrischer 199.
Winkler. Blitzableiter 311.
Winter. Elektrisirmaschine 160; Hygroelektrometer 166.
Wippe 492.
Wirkungsgrad einer Dynamomaschine 802; einer Kraftübertragung 811.
Wollaston's Spitzen 294; Batterie 370.
v. Wroblewski. Widerstand kalter Metalle 426.

Z.

Zamboni. Säule 362; Pendel 363.
Zehfuss. Polarlicht 323.
Zenker. Blitzableiter 316.
Zipernowsky und Deri. Transformator 899.
Zitteraal 1026.
Zitterrochen 1024.
Zöllner. Polarlicht 322; Galvanisches Glühen von Drähten 520.
Zurückwerfungsmethode 760.

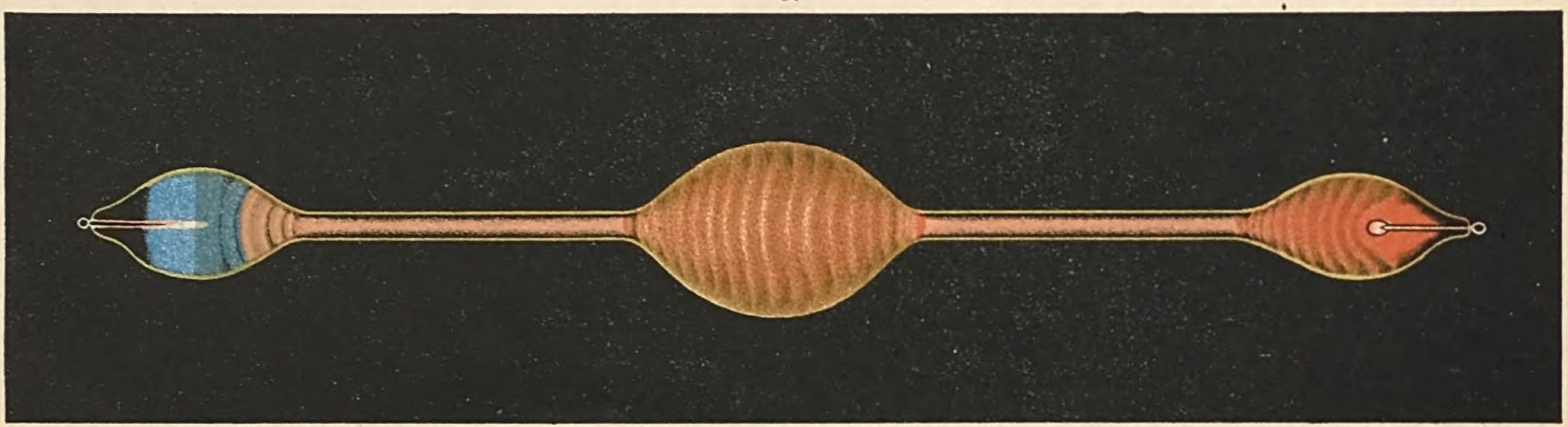
1.



2.



3.



Verlag von Friedr. Vieweg & Sohn in Braunschweig.

Müller, Johann Heinrich Jacob, / Pouillet, Claude Servais Mathias, /
Pfaundler von Hadermur, Leopold,

Müller-Pouillet's Lehrbuch der Physik und Meteorologie in drei Bänden

Bd.: 3

(1888 - 1890)

Phys.g. 628 k-3
urn:nbn:de:bvb:12-bsb11881089-1